

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Institut dopravy

**Analýza nedestruktivních metod
využívaných na letounech typu B737 a
A320 v organizaci údržby.**

Analysis of non-destructive methods used
on B737 and A320 aircraft in maintenance
organization.

Student:

Michal Baranec

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Vojtěch Graf, Ph. D.

Ostrava 2020

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Institut dopravy

Zadání bakalářské práce

Student: **Michal Baranec**
Studijní program: B3712 Technologie letecké dopravy
Studijní obor: 3708R038 Technologie údržby letecké techniky
Téma: **Analýza nedestruktivních metod využívaných na letounech typu B737 a A320 v organizaci údržby**
Analysis of Non-destructive Methods Used on B737 and A320 Aircraft in Maintenance Organization

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Cíl práce:

Vytvoření studijního materiálu pro výuku předmětu Postupy údržby letecké techniky na Vysoké škole báňské – Technické univerzitě v Ostravě, se zaměřením na využití NDT technologií u velkých dopravních letounů.

Osnova práce

1. Úvod.
2. Druhy vad.
3. Metody NDT.
4. Využití NDT na letounech B737 a A320.
5. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

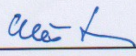
KOPEC, Bernard. Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: (nauka o materiálu IV). Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-80-7204-591-4.

ŠKEŘÍK, Michal, MAŘÁNEK, Pavel. Vizualní metoda stupeň I, II, Praha: ATG s.r.o., 2014.

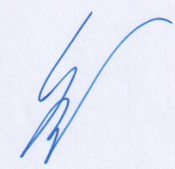
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Vojtěch Graf, Ph.D.**

Datum zadání: 20.12.2019
Datum odevzdání: 18.05.2020


prof. Ing. Aleš Slíva, Ph.D.
vedoucí katedry

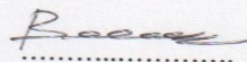



prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh, vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 11. 5. 2020

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Pacek', written over a dotted line.

Podpis

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou*) práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou*) práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské*) práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato bakalářská*) práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 11. 5. 2020

B

Podpis

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

BARANEC, M. *Analýza nedestruktivních metod využívaných na letounech typu B737 a A320 v organizaci údržby: bakalářská práce.* Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Institut dopravy, 2020, s. 81. Vedoucí práce: Graf, V.

Tato bakalářská práce se zabývá analýzou nedestruktivních metod (NDT) k zjišťování závad na letounech typu B737 a A320 v letecké údržbové organizaci a metodikou výběru vhodné metody nedestruktivních zkoušek na konkrétní typ hledané vady. Čtenář se v práci seznámí s důvody pro využití nedestruktivních metod a jejich jednotlivými druhy. Dále se seznámí různými druhy vad, které mohou být pomocí NDT odhaleny. Cílem této bakalářské práce je metodika popisující zvolení vhodné nedestruktivní metody pro zjištění konkrétního typu vady. Bakalářská práce by měla sloužit například jako výukový materiál předmětu Postupy údržby letecké techniky na Vysoké škole báňské – Technické univerzity v Ostravě nebo jako základní výukový materiál pro seznámení techniků údržby s problematikou nedestruktivních metod zjišťování závad.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

BARANEC, M. *Analysis of non-destructive methods used on B737 and A320 aircraft in the maintenance organization: bachelor's thesis.* Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Transport, 2020, s. 81. Leader: Graf, V.

This bachelor's thesis deals with the analysis of non-destructive methods (NDT) to detect defects on aircraft type B737 and A320 in the aviation maintenance organization and the methodology of selecting a suitable method of non-destructive testing for a specific type of defect. The reader will get acquainted with the reasons for the use of non-destructive methods and their individual types. They will also get acquainted with various types of defects that can be detected by NDT. The aim of this bachelor thesis is a methodology describing the selection of a suitable non-destructive method for detecting a specific type of defect. The bachelor's thesis should serve, for example, as a teaching material for the subject Aircraft Maintenance Procedures at the University of Mining - Technical University in Ostrava or as a basic teaching material for acquainting maintenance technicians with the issue of non-destructive fault detection methods.

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Český význam	Anglický význam
A		Airbus
B		Boeing
NDT	Nedestruktivní testování	Non-destructive testing
UV	Ultrafialové záření	Ultraviolet rays
ASTM	Americká společnost pro testování a materiály	American Society for Testing and Materials
SRM	Příručka pro strukturální opravy	Structural Repair Manual
PT	Penetrační zkouška	Penetrant Testing
ECT	Zkouška vířivými proudy	Eddy Current Testing
UT	Ultrazvuková zkouška	Ultrasonic Testing
MT	Magnetická prášková zkouška	Magnetic particle Testing
IRT	Termografická zkouška	Infrared Thermography Testing
RT	Rentgenová zkouška	X-Ray Testing
NRC	Příručka pro opravu	Non Repair Manual

Obsah

1 Úvod	11
2 Druhy vad.....	13
2.1 Struktura pevných látek	13
2.2 Povrchové vady	15
2.2.1 Trhliny	16
2.2.2 Rýhy (Scratches)	17
2.2.3 Korozie (Corrosion)	18
2.2.4 Promáčklina	20
2.3 Podpovrchové vady	21
2.3.1 Vměstky	21
2.3.2 Dutiny	22
2.3.3 Vločkové trhliny	22
2.3.4 Vady kompozitních materiálu	23
3 Metody NDT.....	26
3.1 Kapilární metody	26
3.1.1 Základní teorie kapilárních metod	27
3.1.2 Druhy kapilárních metod	27
3.1.3 Kapilární prostředky	28
3.1.4 Pracovní postupy kapilárních metod	30
3.2 Vířivé proudy	31
3.2.1 Základy elektromagnetických polí	32
3.2.2 Vznik vířivých proudů	32
3.2.3 Hloubka vniku vířivých proudů	33
3.2.4 Nepravé indikace	33
3.2.5 Rozdělní snímacích sond	34
3.2.6 Kontrolní vzorek	36
3.2.7 Zobrazení signálu	37
3.3 Ultrazvuková defektoskopie	38
3.3.1 Základy ultrazvuku	39
3.3.2 Zdroje ultrazvukového vlnění	39
3.3.3 Vznik vlnění pomocí piezoelektrického jevu	40
3.3.4 Metody ultrazvukové defektoskopie	40
3.3.5 Zobrazování ultrazvukového signálu	42

3.3.6	Technika Phased array	42
3.4	Magnetická prášková metoda	44
3.4.1	Základy magnetismu	44
3.4.2	Způsoby magnetizace	44
3.4.3	Princip vzniku magnetického toku nad vadou	46
3.4.4	Detekční prostředky magneticky práškové metody	47
3.4.5	Testovací zařízení	48
3.4.6	Odmagnetování	48
3.4.7	Hodnocení zkoušky	49
3.5	Termografická metoda	50
3.5.1	Infračervené záření	51
3.5.2	Termokamera	51
3.5.3	Postup provádění zkoušky	52
3.5.4	Aplikace termografie v letectví	53
3.6	Radiografická metoda	53
3.6.1	Základy elektromagnetického záření	54
3.6.2	Druhy záření	54
3.6.3	Princip využití záření	56
3.6.4	Volba záření	57
3.6.5	Radiografický film	57
3.6.6	Hodnocení zkoušky	58
4	Využití NDT metod na letounech B737 a A320	59
4.1	SRM a NDT report	60
4.1.1	SRM (Structural Repair Manual)	60
4.1.2	NDT report	61
4.2	Porovnání nedestruktivních metod	61
4.3	Identifikace povrchových vad vyskytujících se na letadlových dílcích	67
4.4	Postup prováděné práce	71
5	Závěr	73
6	Seznam použité literatury	76
7	Seznam použitých obrázků	79
8	Seznam tabulek	81

9	<i>Seznam příloh.....</i>	81
----------	----------------------------------	-----------

1 Úvod

Cílem bakalářské práce je seznámit odbornou veřejnost s jednotlivými nedestruktivními metodami, které se používají v organizaci údržby letecké techniky, a to konkrétně na letounech typu B737 a A320. Práce by měla sloužit jako výukový materiál předmětu Postupy údržby letecké techniky na Vysoké škole báňské – Technické univerzity v Ostravě. Po prostudování bakalářské práce by měl být údržbový personál schopen určit nedestruktivní metodu, která je nejvhodnější pro danou problematiku, což by mělo vést k urychlení procesu vyhodnocování. Také by práce měla sloužit jako pomůcka k zefektivnění pracovního postupu v oboru nedestruktivního testování.

Dnešní letouny jsou navrženy tak, aby byly schopny vydržet co možná největší počet letových cyklů. Po určitých letových cyklech se musí na daném letadlovém dílu provést inspekce (kontrola). Při inspekci je nutné kontrolovat vnější a vnitřní stav letadlového dílu. Lidským okem nelze zachytit mikroskopické vady. Proto personál, který provádí inspekci, využívá NDT přístroje.

Nedestruktivní zkoušení materiálu (NDT), neboli také defektoskopie je nedílnou součástí každé údržby letecké techniky. Jedná se o vysoce žádanou techniku, která může provozovateli a výrobci ušetřit peníze a čas. Výhodou defektoskopie je rychle určení skutečného stavu předmětu tzn., dokáže určit, zda se ve zkoušeném materiálu vyskytují defekty (vady) či nikoliv.

Defektoskopie je soubor metod, které jsou na základě měřitelných, nebo alespoň sledovatelných jevů, schopny odhalit vady ve výrobku bez jeho porušení nebo poškození. Defektoskopie rozhoduje o tom, zda je možné zkoušený výrobek uvést do provozu – zda je nebo není jeho provoz bezpečný. Pokud daný výrobek splňuje předepsané limity po defektoskopické kontrole lze ho ihned použít v provozu. Pokud se při kontrole ve výrobku objeví poškození, je nutná oprava nebo vyzmetkování.

Posouzení přípustnosti vad se stanovuje pomocí výpočtů, modelování nebo také empiricky, a to na základě zkušenosti generací výrobců a provozovatelů. Předepsané limity se nacházejí v provozních normách a standardech.

Zkoušení výrobku pomocí nedestruktivních metod se začalo využívat už v 19 století. V roce 2008 byla založena mezinárodní Akademie NDT, která sídlí v Brescii (Itálie). Úkol Akademie je podporovat výzkum a vývoj v oblasti NDT po celém světě.

2 Druhy vad

Kapitola je zaměřena na nejčastěji objevující se vady, potažmo poškození v leteckém průmyslu. Podmínkou spolehlivé funkce letadlového dílce je jeho správné provedení, jak po stránce materiálové, jenž ovlivňuje mechanické vlastnosti, a také po stránce geometrické, ovlivňující jeho únavnost (životnost). Pokud není provedení letadlového dílce správné, lze předpokládat, že se v takovém dílci budou objevovat různé vady. Je důležité znát všechny vady, které se v letadlovém dílci mohou objevit, určit jejich vznik a vytvořit takové podmínky, aby se výskyt vad omezil na minimum.

Vada neboli také necelistvost, lze definovat jako odchylku výrobku od předepsaných vlastností, které lze najít v technických normách. Existence necelistvosti mění charakter výrobku. Výskyt vady není způsoben jen namáháním součástí v provozu, ale také mohou vznikat ve výrobě při tváření (tváření za studena a za tepla). Vady, které vznikají ve výrobku lze rozdělit do několika skupin, například podle charakteru, příčin vzniku, umístění atd. Podle umístění dělíme vady na povrchové a podpovrchové (vnitřní). Tato skupina vad bude v kapitole dále podrobněji popsána, protože z hlediska nedestruktivního zkoušení se jedná o velice důležitou skupinu.

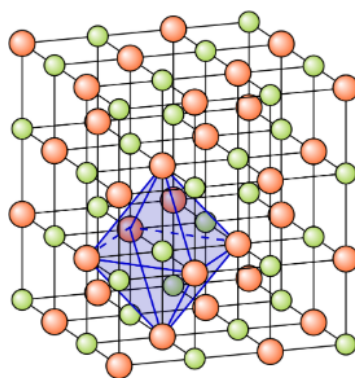
Vady mohou být opravitelné nebo neopravitelné. Pokud se jedná o neopravitelnou vadu, je nutné zkoušený dílec vyzmetkovat a dostatečně označit, aby nedošlo k záměně s funkčním dílcem. U opravitelné vady provádíme opravu v souladu s technickými normami a je velice důležité, aby oprava nebyla v rozporu s dalším fungováním letadlového dílce. V některých případech se ve výrobku nachází vada s vlastnostmi, které jsou v souladu s dovolenými odchylkami. V tomto případě má pojmenování “vada” pouze symbolizující charakter.

Vady v letectví mohou vznikat ze tří důvodu – mechanickým poškozením, chemickou nebo elektrickou reakcí s materiálem či tepelným působením. V leteckém průmyslu vznikají vady nejčastěji v okolí děr, šroubů nebo nýtu, v okolí ostrých hran, přechodů, geometricky složitých součástí a u součástí, které jsou cyklicky namáhány.

2.1 Struktura pevných látek

Nedestruktivní metody zkouší pouze pevné materiály, proto je důležité znát jejich strukturu. Právě od struktury pevných látek se odvíjí charakter vzniklé vady. Každé těleso

(materiál) je tvořeno skupinou částic. Tato skupina částic tvoří krystalovou mřížku (Obr. 2.1), která určuje veškeré vlastnosti a chování materiálu, na které působíme mechanickými, elektrickými, magnetickými a tepelnými silami. Krystalová mřížka je prostorový objekt, tvořena několika elementárními buňkami. Tyto buňky jsou tvořeny částicemi, které mají v elementární buňce přesně předepsanou rovnovážnou polohu. Částice vykonávají kolem této rovnovážné polohy kmitavý pohyb. Podle elementárních buněk lze krystalovou mřížku rozdělit na 7 typů. Nejběžnější typ je krychlová krystalová mřížka. Každá mřížka je charakterizována šesti parametry – tři délky stran a tři úhly sousedících stran.



Obr. 2.1 Struktura ideální krystalové mřížky [1]

V literatuře se lze setkat s pojmem ideální krystalová mřížka. Tato mřížka má pravidelné uspořádání elementárních buněk, ve kterých se opakuje vždy stejné rozložení částic. Toto pravidelné uspořádání je pouze teoretické, protože reálně této pravidelnosti nelze dosáhnout. Často se v krystalové struktuře vyskytují poruchy, též známé jako vnitřní anomálie struktury pevných látek. Vnitřní anomálie způsobí lokální změnu vlastností materiálu. Poruchy mohou být bodové (vakance), čárové (dislokace) nebo plošné.

- Bodová porucha – porucha je způsobena chybějícími částicemi v krystalové struktuře. Částice opustí svou rovnovážnou polohu tehdy, když se zvětší její kmitavý pohyb. Se zvyšující se teplotou materiálu, se zvyšuje kmitavý pohyb.

- Čárová porucha – porucha je charakterizována chybějícími částmi hran nebo celých ploch v krystalovém systému. Nejčastěji mají vliv na mechanické vlastnosti materiálu.
- Plošná porucha – porucha je způsobena změnou koordinace celé skupiny částic v rovině.

Mechanické vlastnosti pevných látek charakterizují schopnost pevné látky odolat vlivu vnějších sil. Když je na těleso působeno vnější silou, dojde ke změně jeho tvaru nebo objemu tzn., těleso se deformuje. Podle způsobu deformace je možné pevné látky rozdělit na látky s dočasnou deformací, trvalou deformací nebo lomovou deformací. Dočasná deformace trvá pouze po dobu působení zatížení. Trvalá deformace (plastická) zůstane i po odstranění zatížení, avšak nedochází k poruše krystalové mřížky. Poslední deformací je deformace lomová, u které dochází k porušení krystalové mřížky a následně ke vzniku trhliny, což je pro provoz velice nebezpečné. Nejnebezpečnější zatížení je takové, které se cyklicky¹ opakuje. V místě cyklického zatížení se napětí koncentruje a dochází ke vzniku jemné trhlinky, která se postupně zvětšuje, až nakonec způsobí rozlomení celé součásti. Aby se součást rozlomila, musí být splněny tři podmínky – vysoká koncentrace napětí, dostatečně velká trhlina a správná lomová houževnatost. Pro zamezení rozlomení je nutné jednu z těchto tří podmínek eliminovat.

2.2 Povrchové vady

Povrchové vady se nacházejí na povrchu materiálu nebo těsně pod povrchem. Na vznik povrchových vad má vliv drsnost a znečištění povrchu. Žádný povrch není zcela rovný, vyskytují se na něm různě velké vruby, které je nutné měřit pomocí speciálních měřidel a porovnávacích šablon (Obr. 2.2). Vruby jsou koncentrátoři napětí, které ve svém okolí ovlivňují napětí, velikost a rozložení deformace tzn., že se kolem vrubu vyskytuje mnohem větší napětí než v ostatních částech materiálu. Vrub má velký vliv na mechanické vlastnosti materiálu (pevnost, houževnatost, tvárnost a pružnost), životnost a na mez únavy².

¹ Cyklické zatížení - je to takové zatížení, při kterém se pravidelně střídá namáhání tahem a tlakem.

² Mez únavy - časový úsek, kdy materiál dokáže být plně funkční, za působení vnějších sil.



Obr. 2.2 Šablona drsnosti povrchu

Dalším faktorem, který přispívá ke vzniku povrchových vad, je znečištění povrchu. Na povrchu mohou uplývat různé druhy tuhých látek (maziva, tuky), které zapříčiní vznik koroze, což je jedna z nejběžnějších povrchových vad.

Tato podkapitola se bude zabývat povrchovými vadami, které se nejčastěji vyskytují v leteckém průmyslu. Jsou to trhliny (cracks), rýhy (scratches), koroze (corrosion), promáčkliny (dents).

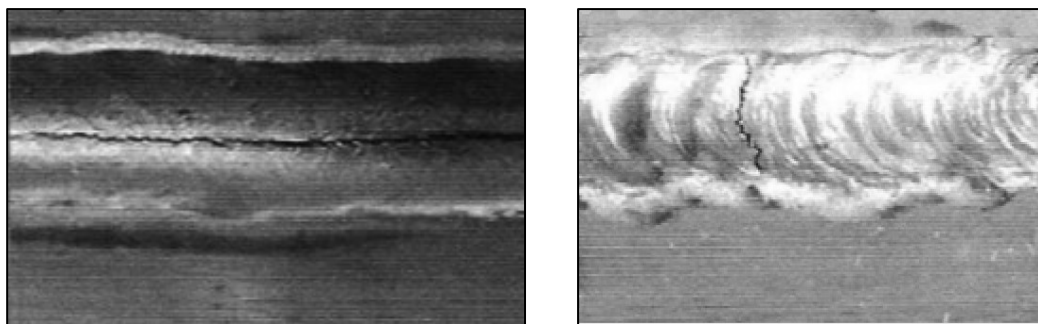
2.2.1 Trhliny

V technické praxi se lze setkat s pojmem trhlinka a prasklinka. Oba tyto pojmy vyjadřují stejnou skutečnost, ale liší se od sebe způsobem vzniku. Trhliny vznikají ve výrobě za tepla a praskliny po vychladnutí daného materiálu, tedy za studena. Tyto dva pojmy se rozlišují pouze ve slevárenství, ale v leteckém průmyslu se používá pouze pojem trhlinka. Trhlinka porušuje kov buď roztržením, nebo popraskáním. Může mít vlasový tvar, který může být různě široký a různě hluboký (několik desítek milimetrů). Z mikroskopického hlediska, trhlinka postupuje napříč zrna, ale také po jejich hranicích.

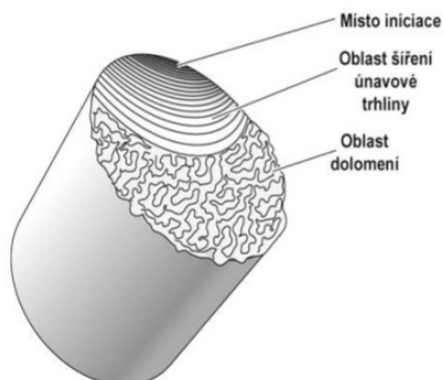
Ve výrobě trhlinka nejčastěji vzniká na hranách ingotů, vzniklých v prvním období tuhnutí. V takovém případě je velmi dlouhá, hluboká a při kontrole zjištělná. V provozu vznikají také trhliny a nazývají se únavové trhliny. Únavové trhliny vznikají cyklickým namáháním (pravidelně se mění působení tlaku a tahu). Únavová trhlinka má specifické tři oblasti lomu (Obr. 2.4). První oblastí je oblast iniciace únavové trhliny. Druhá oblast odpovídá postupnému šíření únavové mikrotrhliny a poslední oblast je oblast dolomení materiálu. Aby se minimalizoval vznik únavových trhlin, je třeba, aby daná součást prošla únavovou zkouškou. Dále je důležité, aby součást byla správně navržena a používána. V leteckém průmyslu se nejčastěji únavové trhliny objevují u děr, drážek,

ostrých přechodů a hran. Trhliny je možné rozdělit podle orientace – podélné a příčné trhliny (Obr. 2.3).

- Podélné trhliny – jsou orientovány kolmo nebo mírně šikmo k povrchu. Vyskytují se nejčastěji na kovových hlavách šroubu, závitových částí šroubů, lanových drátů, hřídelí.
- Příčné trhliny – vyskytují se na hranách výrobků a děr.



Obr. 2.3 Podélná trhlina (vlevo) a příčná trhlina (vpravo) [2]



Obr. 2.4 Únavový lom [3]

2.2.2 Rýhy (Scratches)

S rýhami se v leteckém průmyslu setkáváme běžně. Ve většině případů jsou leteckým personálem zaznamenány okem. Vznikají mechanickým poškozením, například od kamínku odlétajících od pneumatik (nejčastěji spodní strana vztlakových klapek) nebo nešetrným zacházením s nářadím. Rýhy jsou buď mělce přímé anebo jen lehce zakřivené. Hloubka rýhy je omezena. Rýhy ovlivňují dynamickou únavnost materiálu, a proto je důležité, aby byly sledované. Také v místě rýhy může vzniknout napěťová koroze.

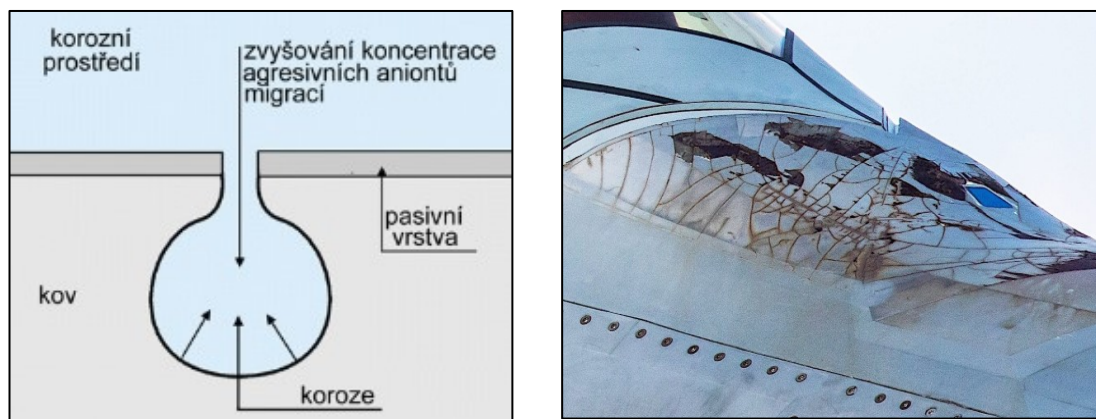
2.2.3 Koroze (Corrosion)

Konstrukce letadel je vytvořena převážně z kovu, a to hlavně ze slitin hliníku (tyto slitiny jsou nejvíce náchylné ke korozi). Proto je koroze jedním z nejvýznamnějších degračních činitelů kovových povrchů v leteckém průmyslu. Ovlivňuje životnost, spolehlivost a snižuje pevnost konstrukčního prvku. Koroze je vlastně znehodnocení povrchu materiálu a je způsobena chemickými nebo elektrochemickými reakcemi mezi materiálem a prostředím. Vzniká především v místech s vysokou vlhkostí, ale také v místě s vysokým obsahem nečistot (prach, tuky, vazelína, soli). Při korozním procesu vznikají produkty, které dobře absorbují vodu. Nejvíce ohrožena místa jsou záhyby, místa se změnou materiálu, prohlubně, ale také místa, která jsou vystavena agresivním chemikáliím. Je potřeba tyto místa čistit a obnovovat protikorozní nátěr (dynitrol). Špatná údržba má za následek urychlení koroze a v některých případech to může vést až k úplnému znehodnocení (proděravění) letadlového dílce.

Korozi lze rozdělit do dvou kategorií – koroze rovnoměrná a nerovnoměrná. Rovnoměrná koroze vzniká na celém povrchu a přibližně s rovnoměrným úbytkem materiálu. Nerovnoměrná koroze je mnohem nebezpečnější, protože probíhá nejen na povrchu, ale také uvnitř materiálu, proto proces diagnostiky je mnohem náročnější. V leteckém průmyslu se objevuje velké množství odlišných druhů koroze, například bodová, štěrbinová, galvanická, nitková, erozivní koroze atd. Několik typu koroze bude popsáno v další části textu.

Bodová koroze

Při bodové korozi vznikají na povrchu kovu hluboké důlky a okolní povrch zůstává nezasažený (Obr. 2.5). Vzniká v důsledku elektrochemické reakce. Tento druh koroze vzniká v místech, kde je oslabena pasivní vrstva. Přítomnost chemikálie na povrchu materiálu patří mezi hlavní faktory ovlivňující bodovou korozi. V místě bodové koroze dochází ke vzniku důlku, ve kterém narůstá koncentrace agresivních iontů a korozivních produktů. V důlku nedochází k výměně roztoku a to způsobuje agresivnější podmínky pro šíření koroze, která prostupuje do větší hloubky. Bodová koroze je často doprovázena štěrbinovou korozi. [4]



Obr. 2.5 Schéma bodové koroze (vlevo) a bodová koroze na potahu draku (vpravo) [5],[6]

Štěrbínová koroze

Jedná se o místní korozi, která vzniká v místech s úzkými štěrbinami (mezerami) mezi povrchem (kovovým i nekovovým), například mezi plechy spojenými nýty nebo pod podložkami. Štěrbínová koroze (Obr. 2.6) je ovlivněna přítomností chloridu sodného. Tato látka se vyskytuje při provozu letadla v přímořských oblastech, v místech s možným únikem kapaliny (okolí palivových, hydraulických víček a okolí toalet). Nejlepší ochrana před štěrbinovou korozí je vhodná konstrukční úprava letadlového dílce tzn., letadlový dílec by měl obsahovat co nejméně štěrbin. U tohoto typu koroze je antikorozní ochrana málo účinná. V údržbové organizaci se tomuto typu koroze lze částečně vyhnout mýtím, čištěním letadlových celků a správným vypouštěním odpadních vod. [4]



Obr. 2.6 Štěrbínová koroze palivového víčka (vlevo) a v rámu nosníku (vpravo)

Galvanická koroze

Tento typ koroze vzniká při spojení dvou odlišných kovů (liší se od sebe elektrochemickým potenciálem), které vložíme do korozivního prostředí. Jeden z kovů

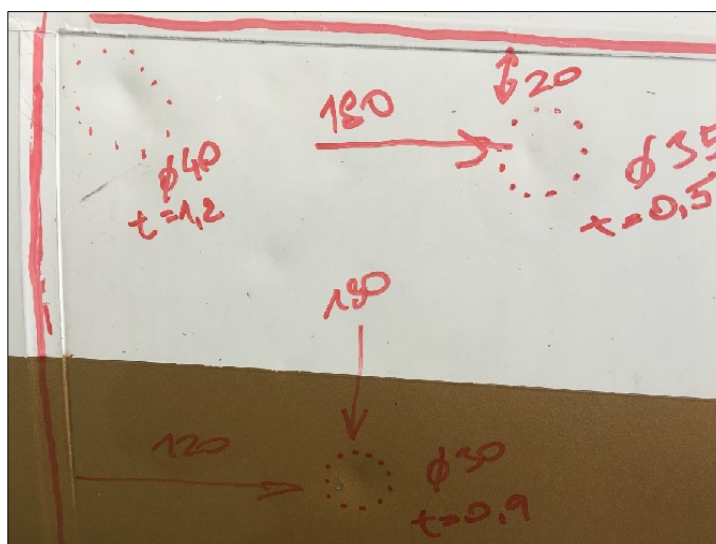
koroduje přednostně, zatímco druhý je před korozí chráněn. Hlavní faktory, které způsobují galvanickou korozi, jsou špatně zvolené materiály a poškozené nátěry. Galvanická koroze (Obr. 2.7) na letadla probíhá například u spojů hliníku a uhlíkových kompozitů.



Obr. 2.7 Galvanická koroze kompozitu

2.2.4 Promáčklina

Promáčklina je poškozená oblast, která je vtlačena dovnitř s ohledem na jeho obvyklý obrys. V materiálu nedochází k žádné změně průřezu, okraje oblasti jsou hladké. Toto poškození vzniká v důsledku mechanického působení. Promáčkliny vznikají nejčastěji na potahu draku, spodní straně křídla a klapky (v důsledku odlétávajících kamínků od podvozku). Promáčkliny se nesmí zanedbávat, protože v tomto místě se zvyšuje napětí materiálu, což může vést až k únavovému lomu. Promáčkliny musí být změřeny a viditelně označeny. Značí se hloubka, šířka, délka a vzdálenost od hran (Obr. 2.8).



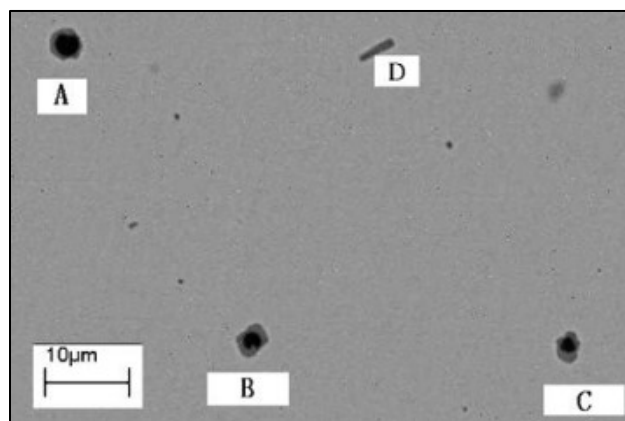
Obr. 2.8 Promáčkliny na potahu Saab 340

2.3 Podpovrchové vady

Podpovrchové vady vznikají ve většině případu při odlévání nebo při tváření daného materiálu. Aby výrobce letadlových dílů minimalizoval výskyt podpovrchových vad, musí dbát na správný výběr materiálu, který splňuje přísné kvalitativní požadavky. Tento druh vady zhoršuje mechanické vlastnosti materiálu. Zjištění podpovrchových vad je velice náročné, protože vady se vyskytují hluboko pod povrchem materiálu, a proto je nutné využít pro detekci nedestruktivních zkoušek. Podpovrchové vady, se mohou stát iniciátorem lomů, proto je důležité se těmito vadami také zabývat.

2.3.1 Vměstky

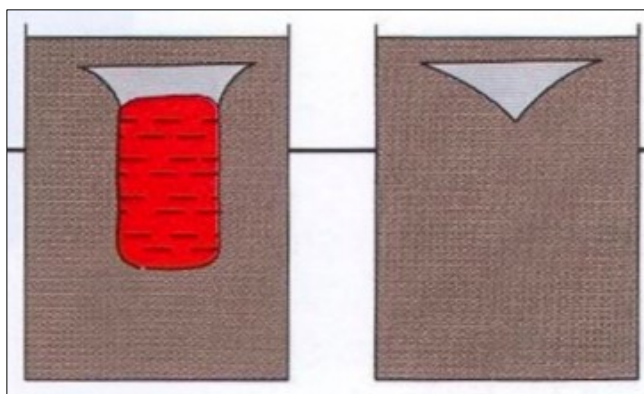
Vměstky (Obr. 2.9) jsou nekovové části v oceli, které jsou vůči základnímu kovu odlišné (nehomogenní). Jsou nebezpečné a způsobují vážné závady materiálu. Například zvyšují křehkost materiálu. Vměstky jsou například sulfidy nebo oxidy uhlíku, které vznikají v průběhu tavení materiálu. Vzhled nekovových vměstků se odvíjí od druhu oceli a velikosti teplot v procesu tavení. Pokud se v jednom místě koncentruje více vměstků, nazývá se toto místo vycezenina.



Obr. 2.9 Rozložení vměstků v oceli [7]

2.3.2 Dutiny

Za dutiny v materiálu jsou považovány staženiny a bubliny. Při tuhnutí dochází ke smršťování materiálu, což má za následek vznik staženin a bublin (Obr. 2.10) tzn., vznikají při zmenšování objemu materiálu. Pokud je dutina otevřena povrchu, jedná se o pór. Vliv dutiny při statickém zatížení je malý, vliv se zvětšuje u dynamického a cyklického namáhání například ohyb. Při dynamickém nebo cyklickém namáhání se dutina postupně zvětšuje a vzniká takzvaná výduť, která způsobí rozlomení materiálu.

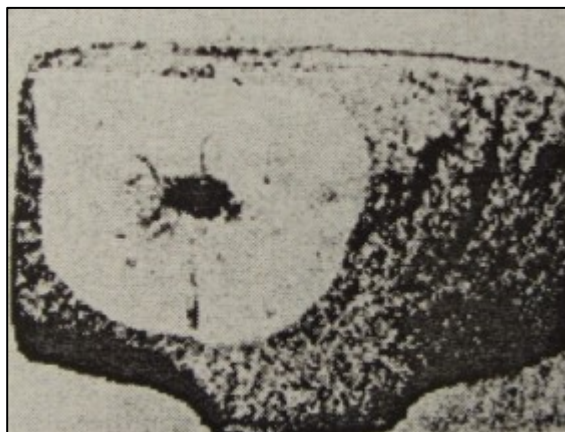


Obr. 2.10 Vznik dutiny ve výrobě [1]

2.3.3 Vločkové trhliny

Jsou to trhliny, které mají obvykle kruhový nebo eliptický tvar. Nejčastěji mají průměr několika milimetrů. Vločky (Obr. 2.11) jsou napěťové trhliny vznikající společným působením mikropnutí, vyvolaného uvolňováním vodíku při chlazení vývalku. Při chlazení se vodík hromadí v materiálu a tím dochází k místní koncentraci

napětí, což způsobuje vznik necelistvosti – vločky. Vločky působí jako vnitřní vruby. Jsou velice nebezpečné hlavně u cyklického namáhání, kdy mohou vyvolat vznik a šíření únavových trhlin. [1]



Obr. 2.11 Vločková trhlina [1]

2.3.4 Vady kompozitních materiálu

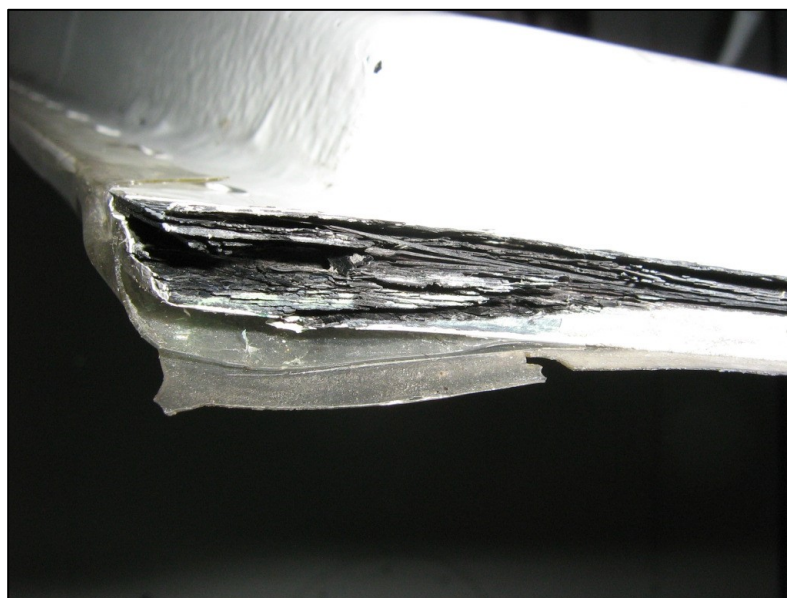
V dnešní době je kompozitní materiál nedílnou součástí konstrukce každého moderního letounu. I u tohoto druhu materiálu se vyskytují vady, které jsou ve většině případů způsobené provozem. Kompozit je materiál, který se skládá z dvou a více fází. Jednotlivé fáze se od sebe liší vlastnostmi (chemickými, mechanickými). Pokud, jsou tyto fáze pohromadě, vzniká kompozitní materiál, který má mnohem lepší vlastnosti než fáze samotné. Kompozit je tvořený matricí a nosnou vrstvou (Obr. 2.12). Kompozitní materiál je v leteckém průmyslu hojně využíván, hlavně kvůli jeho výborným provozním vlastnostem. Je to pevný materiál, který je lehký a velice houževnatý. Nevýhodou kompozitu je obtížná diagnostika vad a hlavně následná složitá oprava. Při vyhodnocování stavu materiálu se využívá nedestruktivních zkoušek. U kompozitního materiálu dochází nejčastěji k delaminaci, prasklinám a promáčklínám.



Obr. 2.12 Schéma kompozitního materiálu [1]

Delaminace

Delaminace je nejčastější a nejkritičtější vada kompozitu, která je způsobená oddělením jednotlivých vrstev materiálu (Obr. 2.13). Delaminace zhoršuje mechanické vlastnosti kompozitních materiálů. Obecně se objevují v důsledku nadměrného nerovnoměrného napětí (Obr. 2.14), které je vytvářeno na rozhraní vrstev. Delaminace může vést k nedostatečné podpoře nosných vrstev kompozitu, což podporuje růst poškození, a to vede k předčasnému selhání letadlového dílce. Delaminaci lze jednoduše diagnostikovat pomocí pokleповého testu (tap testing). Pokleповý test je stará, jednoduchá technika NDT. Tato metoda funguje na principu změny tónu zvuku při poklepání kladívkem po zkoušeném materiálu, přičemž tupější zvuk, může naznačovat výskyt vady.



Obr. 2.13 Delaminace kompozitu



Obr. 2.14 Delaminace kolem místa průchodu blesku

3 Metody NDT

V této kapitole budou popsány jednotlivé nedestruktivní metody, které se nejčastěji používají v leteckém průmyslu. Jednotlivé metody pracují s různými fyzikálními zákony, které budou vysvětleny v příloze. Při volbě nedestruktivní metody je důležité nahlížet na řadu faktorů, jakou jsou mechanické vlastnosti materiálu, fyzikální vlastnosti materiálu, velikost zkoušeného materiálu a správný výběr přípravků (zařízení) pro provedení zkoušky. Všechny tyto hlediska budou v kapitole popsány.

Metody nedestruktivního testování slouží k zjišťování skutečného stavu materiálu. Metody pomáhají najít povrchové a podpovrchové vady ve zkoušeném materiálu. Pro zjištění všech typů vad, se jednotlivé metody kombinují. Nedestruktivní metody jsou v letectví velice žádané, protože snižují počet nehod a zvyšují spolehlivost, bezpečnost a zaručují delší provozuschopnost materiálu.

3.1 Kapilární metody

Jednou z nejstarších defektoskopických metod je kapilární metoda. První zkoušení materiálu pomocí kapilární metody bylo již v 19. století na železničních kolejích. Zkouška se prováděla za pomoci petroleje a vápenného mléka.

Kapilární defektoskopie pracuje s vlastnostmi některých kapalin. Tyto kapaliny se nazývají penetranty. Penetranty se používají ke zjišťování povrchových necelistvostí materiálu, jako například trhliny, studené spoje, porezity apod. Princip kapilární metody spočívá ve využití vztlakovosti a smáčivosti penetrantů a jejich barevnosti nebo fluorescence. Kapilární metoda má mnoho výhod, proto je v leteckém průmyslu hojně využívána. Hlavní výhodou kapilární metody je její principiální a aplikační jednoduchost. Další výhodou je její univerzálnost. U kapilární metody nezáleží tolik na rozměrech a chemickém složení materiálu, jako u jiných defektoskopických metod. Výhoda je také její nízká ekonomická náročnost, neboť zkoušky jsou provozně i investičně relativně levné a také přiměřeně rychlé. Zkoušky jsou také poměrně přesné. Hlavní nevýhodou kapilárních metod je neschopnost zjištění vady, která není přímo spojena s povrchem zkoušeného materiálu. Pro zjištění vad uvnitř materiálu je nutné použít jinou defektoskopickou metodu. [1]

3.1.1 Základní teorie kapilárních metod

Kapilární defektoskopie pracuje z vlastností některých kapalin (penetrantů). Citlivost a průběh zkoušky tedy závisí nejvíce na vlastnostech kapalin. Popis vlastností kapalin je blíže specifikován v příloze č. 3.1.

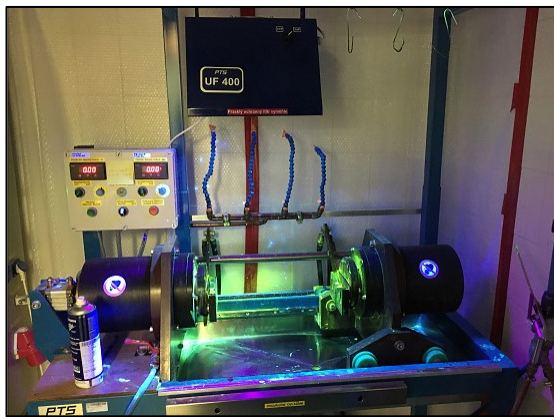
3.1.2 Druhy kapilárních metod

Kapilární metody lze rozdělit podle druhu vytvoření indikace a způsobu hodnocení, do tří kategorií:

- metoda barevné indikace,
- metoda fluorescenční,
- metoda dvoj-účelová.

Při použití barevné indikace se přítomnost necelistvosti projeví vznikem červené indikace na bílém podkladu. Sytost červené indikace je závislá na množství detekční kapaliny v necelistvosti. Hodnocení kapilární zkoušky se vyhodnocuje na bílém světle (denním, zářivkovém, žárovkovém). Při hodnocení nesmí bílé světlo vytvářet stíny. Pro detailnější kontrolu je vhodné použít ruční lampu. Intenzita osvětlení bílým světlem musí být v rozmezí 500 až 5000 luxů.

Při fluorescenčním metodě se zkoušený povrch předmětu prohlíží v zatemněném prostoru černým světlem ultrafialové lampy (Obr. 3.15). Přítomnost necelistvostí se projeví vznikem indikace, která světélkuje žlutozeleně. Viditelnost fluorescenční indikace je závislá jednak na množství detekční kapaliny, ale také na výkonu ultrafialové lampy. Intenzita osvětlení černým světlem ultrafialové lampy je stanovena nejméně na 500 luxů. Při této hodnotě se zjišťují trhliny velkých rozměrů. Pro zjištění jemných trhlín je hodnota minimálně 1000 luxů. [1]



Obr. 3.15 Komora pro ultrafialovou lampu (vlevo) a přípravek na měření UV světla (vpravo)

Metoda dvoj-účelová spojuje obě výše zmíněné metody do jedné. Vyhodnocení indikace závisí na tom, jaký druh osvětlení je použit. Pokud je použito bílé světlo, trhlina se projeví barevně. Je-li použito černé světlo, trhlina se projeví světélkováním.

3.1.3 Kapilární prostředky

Kapilárními prostředky jsou označovány prostředky, které jsou potřebné pro provedení kapilární zkoušky. Prostředky tvoří dohromady kapilární set, který je vždy od jednoho výrobce. Tento kapilární set je tvořen:

- penetranty (detekční kapalina),
- emulgátory,
- vývojkami,
- čističi a odmašťovači.

Kapilární prostředky jsou použitelné v rozmezí teplot od +5 °C do 50 °C. Někdy je však nutné, aby rozsah teplot byl větší, proto byly vyvinuty speciální kapilární prostředky. Prostředky pro nízké teploty až – 40 °C, jsou založeny na bázi benzinových rozpouštědel (viskozita se s klesající teplotou nemění). Pro vysoké teploty až do 260 °C se používají kapilární prostředky ve formě tuhých látek, které se při vyšší teplotě roztaví. U nízkoteplotních a vysokoteplotních prostředků je snížena citlivost metody, proto se doporučuje provádět zkoušky za běžných teplotních podmínek.

Penetranty

Pro praktickou aplikaci kapilárních metod je nutnou podmínkou použití vhodných, kapilárně aktivních penetrantů, které dobře pronikají do vad a po odstranění jejich přebytku z povrchu vzlínají zpět na povrch. Penetrant musí mít vyšší povrchové napětí, malý krajový úhel a nízkou vzlínavost. Každá necelistvost má odlišné nároky na penetrant, proto je nezbytně nutné znát vlastnosti penetrantů. Mezi vlastnosti penetrantu lze zahrnout – penetrační schopnost³, bod vzplanutí, chemická netečnost, toxicita a zápach. Jednotlivé vlastnosti detekčních kapalin musí být v plném souladu. Často se ale stává, že vlastnosti jsou navzájem protichůdné. [1]

Emulgátory

Emulgátory jsou povrchově účinné látky, které usnadňují rozptýlení pevných látek nebo kapalných látek v kapalině (obvykle ve vodě) v níž se normálně nerozpouštějí. V kapilárních zkouškách emulgátory usnadňují odstranění přebytku penetrantu z povrchu zkoušeného materiálu.

Vývojky

Vývojka je činidlo, které je nanášeno na povrch zkoušeného materiálu, bezprostředně po odstranění penetrantu. Vývojka pomáhá vzlínat penetrant z necelistvosti, a také zvýraznit indikaci (u barevné metody). Zvýraznění se děje pomocí absorpce penetrantu. Dalo by se říct, že vývojka funguje jako “ savý papír “.

Vývojky mají dvě základní složky. První složkou je bílý prášek jemného zrnění, který nesmí být hygroscopický. Druhou složkou je nosné prostředí, kterým je například vzduch, voda, líh, benzín. Podle nosného prostředí lze vývojky rozdělit na 3 základní druhy – suché (naprašují se), mokré těkavé vývojky (nanášení sprejem) a mokré vodné vývojky (ponoření do vývojkové lázně). [8]

Čističe a odmašťovače

Odmašťovače odstraňují tuky nebo oleje ze zkoušeného povrchu před nanášením penetrantu. Mohou být organického (benzín, aceton) nebo anorganického původu.

³ Penetrační schopnost - rychlost vnikání detekční kapaliny do povrchových necelistvostí.

3.1.4 Pracovní postupy kapilárních metod

Každý pracovník, který provádí zkoušení materiálu kapilární metodou je povinen se přesně řídit stanovenými postupy. Zda pracovník provádí kapilární metodu správně, si lze ověřit na kontrolním vzorku (Obr. 3.16). Na kontrolním vzorku jsou připraveny vady. Vady se objeví na povrchu jen tehdy, když provádějící pracovník splní předepsaný postup. Pokud není postup splněn, vady se na povrchu neobjeví. Kapilární zkouška má pět základních kroků, které je nutno splnit. Jsou to tyto kroky:

- příprava povrchu,
- nanesení penetrantu (detekční kapaliny),
- odstranění přebytku penetrantu,
- vyvolání,
- vyhodnocení zkoušky.

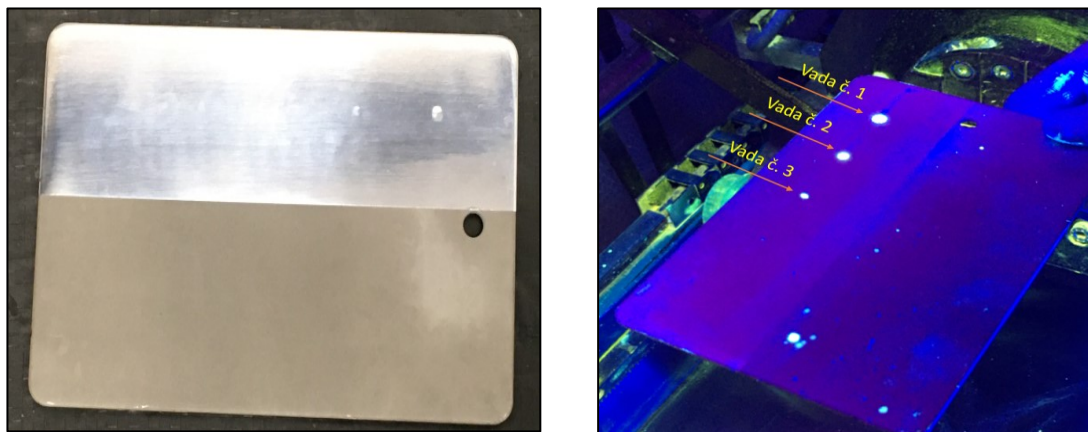
Prvním krokem pro zvládnutí kapilární zkoušky je důkladné očištění povrchu. Ze zkoušeného povrchu je nutné odstranit veškeré tuhé a kapalné nečistoty. Čistění povrchu se děje pomocí organických nebo anorganických čističů. Velmi účinné je čistění v parách čističů. Náročnější technikou čistění je pomocí ultrazvuku v lázni rozpouštědla. Po očištění je nezbytně nutné usušit povrch. Zbytky rozpouštědel mohou ovlivnit kontrast barevné nebo fluorescenční indikace.

Dalším krokem je vhodná volba penetrantu a správné nanesení na zkoušený materiál. Penetrant potřebuje dostatek penetračního času⁴, aby mohl proniknout do jemných necelistvostí. Délka penetračního času je obvykle 5 až 20 minut a odvíjí se od druhu penetrantu, teploty, charakter zjišťovaných vad a požadovaná citlivost zkoušky (čím jemnější vada, tím delší penetrační čas). Penetranty je možno nanášet na zkoušený předmět těmito způsoby – ponořením zkoušeného předmětu do penetrační lázně (jednoduchý a spolehlivý způsob), nátěr štětcem nebo nástřikem. Po nanesení penetrantu a uplynutí požadovaného penetračního času dochází k odstranění penetrantu pomocí solventu⁵. Odstranění penetrantu je důležité, aby nedocházelo k vytváření barevného nebo fluorescenčního pozadí. Následujícím krokem je nanesení vývojky. Vrstva musí být nanášena rovnoměrně, aby neovlivňovala sytost indikace. [1], [8]

⁴ Penetrační čas – časový usek, během kterého je kapalina v přímém styku se zkoušeným materiálem.

⁵ Solvent – je to označení pro látku se schopností rozpouštět jiné látky.

Po splnění všech těchto kroků následuje vyhodnocení výsledku zkoušky. Vyhodnocení je mnohem více závislé na zkušenost pracovníka než všechny předcházející kroky. Na zkoušený předmět se prohlíží okem pomocí lupy. Povrch se prohlíží dvakrát. Poprvé ihned po nanesení vývojky (pro zachycení velkých vad) a podruhé po uplynutí 15 minut (pro zachycení jemných vad). Zjištěné vady se nejčastěji zaznamenávají fotograficky (Obr. 3.16).



Obr. 3.16 Referenční vzorek před zkouškou (vlevo) a po zkoušce (vpravo)

3.2 Vířivé proudy

První zmínky o vířivých proudech přinesl francouzský vědec Dominique Arago v druhé polovině 19. století. Tato metoda je založena na principu elektromagnetické indukce, která byla objevena v roce 1831 Michaelem Faradem. Vědec Hughes se zabýval změnou vlastností cívky, která byla umístěna do kontaktu s vodivým materiálem. Vodivý materiál zapříčinil změnu vlastností cívky. V technické praxi jsou však vířivé proudy nežádoucí, protože způsobují energetické ztráty v elektrických zařízeních. Při těchto energetických ztrátách vzniká teplo, které je nežádoucí pro chod elektrických strojů. V roce 1950 se začal Friedrich Föster zabývat tímto jevem a přišel na to, jak vířivé proudy využít k nedestruktivnímu zkoušení. Začal vyvíjet vysoce citlivá zařízení, která měřila změnu magnetického pole. První zařízení, které měřilo změny magnetického pole, bylo nainstalováno na družici, která zkoumala magnetické pole Venuše.

Metoda vířivých proudů se používá u materiálů, které jsou schopny vést elektrický proud. Metodu lze využít u feromagnetických, ale také u ne feromagnetických materiálů. V leteckém průmyslu se jedná o hojně využívanou metodou.

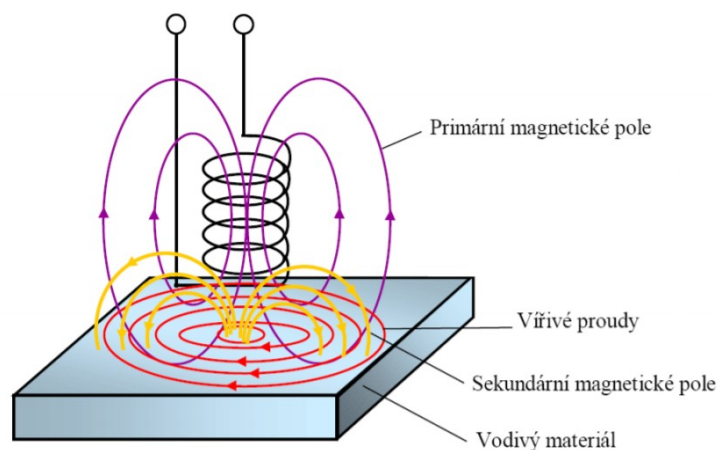
Metoda vířivých proudů je poměrně levná metoda, u které je možno proces zkoušení zautomatizovat, což v důsledku časové úspory je velice výhodné. Se správnou frekvencí dokáží vířivé proudy detekovat vadu těsně pod povrchem. Také se jedná o jednu z mála metod, která dokáže detekovat vadu, při vysokých teplotách např. kontrola za tepla u válcového materiálu. Jako každá metoda, tak i metoda vířivých proudů má své nevýhody. Pomocí metody vířivých proudů nelze zaznamenat vady hluboko pod povrchem, a také je tato metoda velmi citlivá na rozměry zkoušeného dílce.

3.2.1 Základy elektromagnetických polí

Metoda vířivých proudů pracuje s vlivem elektromagnetických polí, která působí na elektricky vodivý materiál. Veškeré důležité informace ohledně elektromagnetických polí jsou popsány v příloze č. 3.2.

3.2.2 Vznik vířivých proudů

K vybuzení vířivých proudů v materiálu se využívá cívka (budící cívka), kterou prochází střídavý proud s určitou frekvencí. V důsledku průchodu střídavého proudu cívkou vzniká okolo cívky magnetické pole (primární magnetické pole). Primární magnetické pole je kolmé na závity cívky. Pokud se do dosahu primárního magnetického pole dostane vodivý materiál, vyvolá v materiálu uzavřené smyčky – vířivé proudy (Obr. 3.17). Vířivé proudy probíhají po kruhových drahách, které jsou rovnoběžné s povrchem. Vířivé proudy mají vlastní magnetické pole (sekundární magnetické pole). Sekundární magnetické pole působí proti primárnímu magnetickému poli. Vada v materiálu způsobí změnu dráhy vířivých proudů, tedy změnu velikosti sekundárního magnetického pole, a tím i změnu velikosti primárního magnetického pole – změny sledujeme a zaznamenáváme. Pro znázornění principu detekce změn elektromagnetického pole se používá wheastoneuv můstek. Na tomto principu pracovaly první vířivoproudé přístroje. [10]



Obr. 3.17 Vznik vířivých proudů ve zkoušeném materiálu [11]

3.2.3 Hloubka vniku vířivých proudů

Vířivé proudy nejsou rozloženy ve zkoušeném předmětu rovnoměrně. Jak je zmíněno v předchozím odstavci, cívkou prochází střídavý proud o určité frekvenci. Tato frekvence má výrazný vliv na rozložení vířivých proudů ve zkoušeném materiálu. Rozložení vířivých proudů ve zkoušeném materiálu se nazývá skin – efekt. S rostoucí frekvencí je rozložení vířivých proudů na povrchu větší a zároveň vířivé proudy zasahují do menší hloubky.

3.2.4 Nepravé indikace

Během zkoušení materiálu pomocí vířivých proudů mohou být zaznamenány nepravé indikace. Nepravé indikace jsou rušivé elementy, které brání tomu, aby se správně detekovala vada ve zkoušeném materiálu. Nepravé indikace lze rozdělit:

- elektromagnetická indikace,
- geometrická indikace.

Elektromagnetická indikace

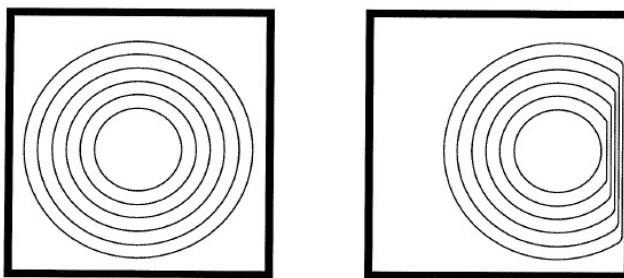
Nejčastější chyby měření souvisí se změnou elektromagnetické vazby mezi sondou a zkoušeným materiálem. Elektromagnetická indikace se dělí na:

- efekt oddálení (lift – off efekt) – při tomto jevu dochází k oddálení sondy od zkoušeného materiálu a vyskytuje se nejčastěji u příložných sond,
- změna činitele zaplnění – tento jev se nejčastěji vyskytuje u trubek, kdy je sonda na povrchu nebo uvnitř trubky.

Geometrické indikace

Tyto nepravé indikace jsou způsobené změnou tvaru zkoušeného materiálu. Geometrické indikace se dělí na:

- **krajový efekt** – vyskytuje se v blízkosti hran a děr, a pokud se přiblíží snímač do blízkosti hran, změní se rozložení vířivých proudů (Obr. 3.18),
- **koncový efekt** – tento efekt se vyskytuje u trubek a bude-li se nacházet vada v blízkosti konce trubky, indikace vady zanikne v důsledku koncového efektu.



Obr. 3.18 Krajový efekt [10]

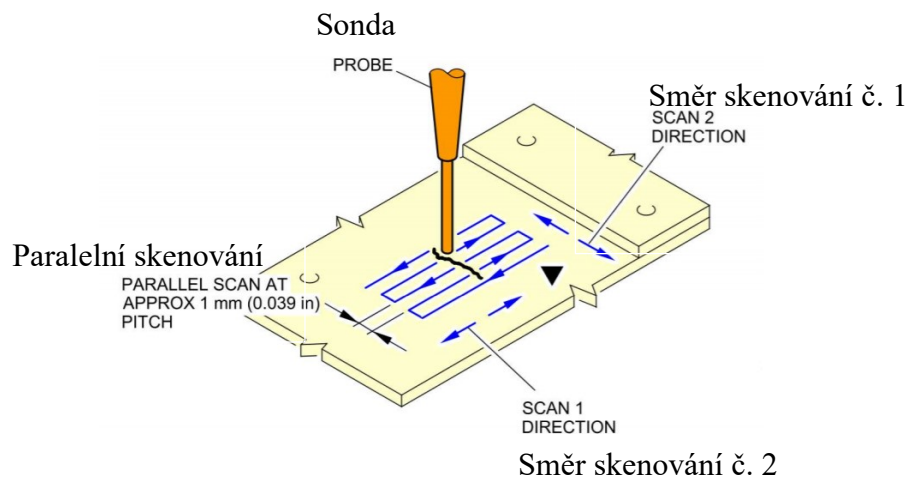
3.2.5 Rozdělení snímacích sond

V dnešní době jsou na sondy kladeny velké nároky a to v důsledku narůstající náročnosti kontroly výrobků. Snímací sondy lze rozdělit na:

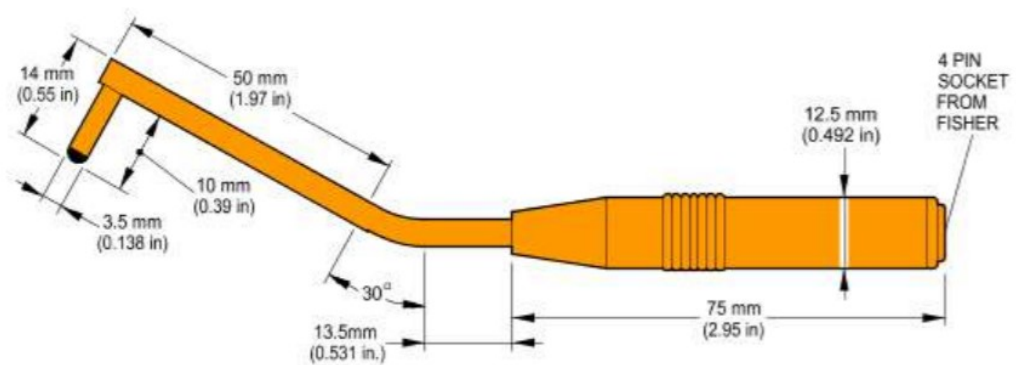
- **příložné** – mají příložnou cívku, mezi příložné sondy lze zařadit sondy příložné, rotační a transmisní a tento typ snímacích sond se nejčastěji využívá v leteckém průmyslu,
- **průchozí** – mají průchozí cívku.

Sondy příložné

Pomocí příložných sond (Obr. 3.20) lze zkoušet rovinné vzorky, ale také objekty s nepravidelným tvarem. Sonda je zpravidla přikládána kolmo ke zkoušenému povrchu. Nízkofrekvenční příložné sondy je možné využít pro kontrolu trhlin ve druhé nebo třetí vrstvě v několikavrstevné konstrukci. S příložnou sondou je nutné konat příčný a podélný pohyb vůči zkoušenému materiálu (Obr. 3.19), aby se eliminovala možnost nezachycení vady. Z pravidla se na hlavičku příložné sondy lepí vrstva nevodivé pásky, která chrání sondu před poškozením. [10]



Obr. 3.19 Pohyb příložné sondy po zkoušeném materiálu [21]



Obr. 3.20 Příložná sonda [21]

Sondy rotační

Tyto sondy se používají pro kontrolu otvorů pro nýty nebo šrouby. Jedná se o příložnou sondu, která má zabudované cívky z boku do tělesa sondy (Obr. 3.21). Při rotačním pohybu cívka skenuje vnitřní povrch otvoru.



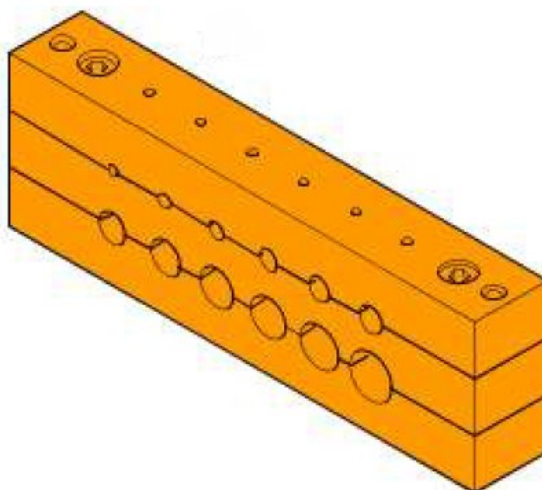
Obr. 3.21 Sonda rotační

Sonda transmisní

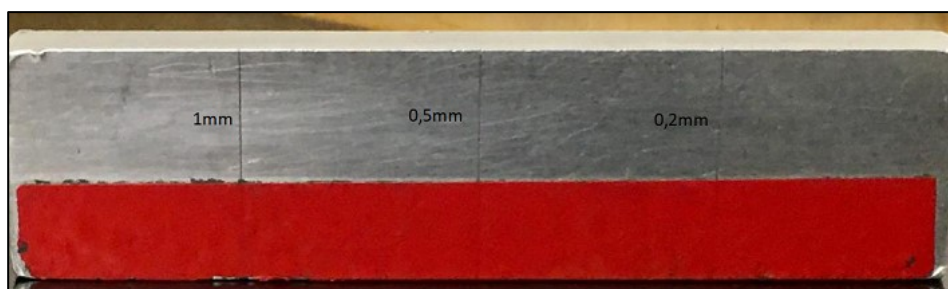
Transmisní sondy jsou typické tím, že snímací a budicí cívka se nachází z různých stran materiálu. Tyto sondy se používají pro kontrolu materiálu s menší tloušťkou.

3.2.6 Kontrolní vzorek

Každá snímací sonda se musí správně nastavit ještě před tím než je použita. K tomuto nastavení se využívá kontrolní vzorek. Kontrolní vzorek má simulovat podmínky hledané vady, a proto musí mít podobné základní parametry jako zkoušený výrobek. Musí mít podobné elektromagnetické vlastnosti. Nejčastěji je kontrolní vzorek vyroben z titanu nebo hliníku a je opatřený umělými vadami, které mají napodobit skutečnou vadu. Každý typ snímací sondy má specifický kontrolní vzorek. U příložných sond se používá plochá destička, které má umělé vady provedeny ve formě drážek (zpravidla podélné) (Obr. 3.23). Drážky mají hloubku 1mm, 0,5 mm a 0,2 mm. V některých případech je také potřeba nasimulovat barvu na zkoušeném objektu, proto se část kontrolního vzorku přelepí barevnou páskou. Rotační sondy mají destičku s předvrtanými dírami (o různém průměru), které jsou opatřeny drážkami nebo vyvrtanými otvory z boku kontrolního vzorku (Obr. 3.22). [1]



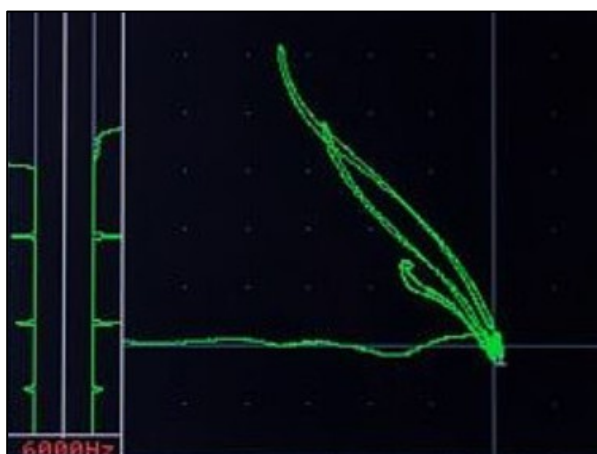
Obr. 3.22 Referenční vzorek pro rotační sondu [21]



Obr. 3.23 Referenční vzorek pro příložnou sondu

3.2.7 Zobrazení signálu

Signál může být zobrazen různými způsoby například impedančním displayem (nejčastější zobrazení) (Obr. 3.24) nebo voltmetrem.



Obr. 3.24 Zobrazení signálu pomocí křivek

3.3 Ultrazvuková defektoskopie

Ultrazvuk je akustické vlnění, které se šíří prostředím o frekvenci nad hranici slyšitelnosti lidského ucha. Lidské ucho je schopno vnímat frekvenci od 16 Hz do 20 kHz. Akustické vlnění bylo popsáno už v 18 století italským vědcem Spallanzanim. Ten ve své knize popisuje pohyb netopýrů, kteří se za tmy orientují podle zvukových vibrací (echolokace). V roce 1929 ruský vědec Sokolov zjistil, že pokud se v materiálu vyskytuje vnitřní defekt, klesá amplituda vlnění, která prochází materiálem. Tento ruský vědec je považován za zakladatele ultrazvukové defektoskopie. V roce 1942 pan Firestone využil Sokolovových poznatků a jako první začal zkoušet materiály pomocí akustického vlnění. Následně zkonstruoval ultrazvukový defektoskop, který se začal využívat pro zkoušení materiálu. První výrobky, které začaly být pravidelně kontrolovány ultrazvukem, byly německé železniční nápravy, které měly problémy s únavovými lomy.

Zkoušení pomocí ultrazvukové defektoskopie vzniklo z potřeby zjišťovat vnitřní vady v materiálu. Metoda je založena na změnách propustnosti a odrazivosti ultrazvukových vln, vlivem vyskytující se vady v materiálu. Ultrazvukové vlny se mohou pohybovat pouze v elastickém prostředí. Vlny se dokáží šířit v kovových, ale i v nekovových materiálech jako jsou například kompozitní materiály, které jsou v letectví v dnešní době velmi využívány. [12]

Pomocí ultrazvukového vlnění lze detekovat vnitřní vady materiálu. Nejlépe se zjišťují vady, které jsou orientovány kolmo k ultrazvukovým vlnám. Velkou výhodou ultrazvuku je možnost měření vad v hlubších vrstvách materiálu. Při použití této metody, dokážeme přesně lokalizovat vadu a odhadnout její velikost. V leteckém průmyslu se také využívá ultrazvuk k zjištění úbytku materiálu, po odstranění koroze nebo po broušení. Jednou z nevýhod ultrazvuku je citlivost na šum⁶, který může znehodnotit výsledek měření. Aby se vlnění šířilo materiálem správně je nutné dokonale vyčistit zkoušený povrch, což může být časově náročné. Pokud by vlny byly orientovány rovnoběžně vzhledem k vadám, mohlo by dojít jejich nezaznamenání. Špatná orientace vln patří k dalším nevýhodám ultrazvuku.

⁶ Šum - akusticky nečisté prostředí.

3.3.1 Základy ultrazvuku

Základní parametr, který ultrazvuk charakterizuje je vlnění. Vlnění se šíří prostředím a využívá zákon geometrické optiky. Veškeré vlastnosti vlnění jsou popsány v příloze č. 3.3.

3.3.2 Zdroje ultrazvukového vlnění

K vytvoření ultrazvukového vlnění se používá elektroakustické zařízení, které obsahuje jeden nebo více měničů. Měnič může vysílat nebo přijímat signál vlnění. V současné době se používá piezoelektrický typ měniče. [1]

Piezoelektrický měnič

V ultrazvukové defektoskopii se využívají sondy, které pracují na principu piezoelektrického jevu. Piezoelektrický jev je schopnost krystalové mřížky materiálu, generovat elektrické napětí při její deformaci. Sonda bývá nejčastěji vyrobena z piezokeramiky a má obvykle kruhovou nebo obdélníkovou destičku. Vlnění z měničů se šíří pouze v určitém směru. Směr je určen tvarem a uložením sondy. Podle vysílaného signálu, jsou sondy rozděleny do dvou kategorií:

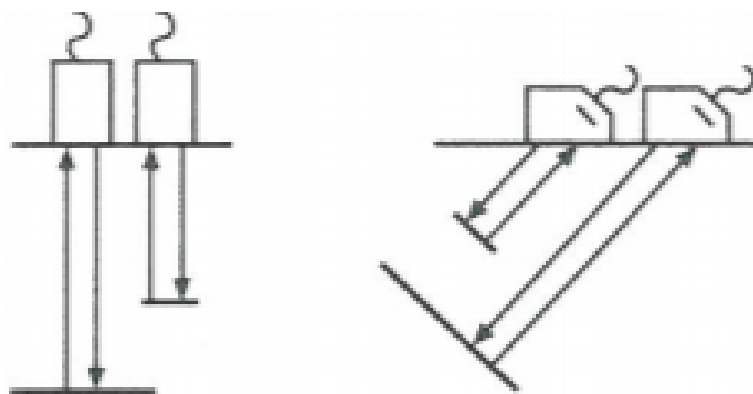
- přímá sonda,
- úhlová sonda.

Přímá sonda

Přímá sonda vysílá vlny, které jsou orientovány kolmo ke zkoušenému povrchu (Obr. 3.25). Sonda je uložena jako celek v uzavřeném kovovém pouzdře a je chráněna před mechanickým poškozením tvrdou otěruvzdornou vrstvou. Ochranná vrstva nemůže být příliš velká, aby nedocházelo ke zkreslení signálu. Přímé sondy jsou využívány u výrobků, ke kterým je dobrý přístup a zkoušený povrch je rovný.

Úhlová sonda

Vlnění, které úhlová sonda vytváří je orientovaná vůči zkoušenému materiálu pod určitým úhlem (Obr. 3.25). Úhlové sondy jsou vyrobeny z plexisklového klínu, který slouží jako ochranná vrstva. Plexisklový klín je velmi náchylný na opotřebení. Proto je nutné pravidelně kontrolovat jeho stav, aby nedocházelo k tomu, že úhel mezi sondou a zkoušeným povrchem bude nevyhovující. Úhlová sonda se nejčastěji používá při zkoušení svarů.



Obr. 3.25 *Prímá sonda (vlevo) a úhlová sonda (vpravo)* [12]

3.3.3 Vznik vlnění pomocí piezoelektrického jevu

Pokud piezoelektrický měnič sloužil jako zdroj ultrazvukového vlnění, je nutné přivádět střídavé elektrické napětí na stěny měniče. Elektrické napětí rozkmitá měnič a následně vznikne vlnění, které se šíří prostředím. Generátor poskytuje střídavé napětí o určité frekvenci, odpovídající vlastní rezonanční frekvenci konkrétního piezoelektrického měniče. Velikost rezonanční frekvence je závislá na mechanických vlastnostech a rozměrech měniče. Následný signál je přijímán druhým měničem (průchodová metoda), anebo je možno přijímat signál i pomocí měniče, který signál vytváří (odrazová metoda). [12],[13]

3.3.4 Metody ultrazvukové defektoskopie

Ultrazvukovou defektoskopii lze rozdělit podle principu zjišťování vad v materiálu na – průchodovou, odrazovou.

Průchodová metoda

Průchodová metoda je opatřena vysílačem a přijímačem, který je umístěn na protilehlých stranách zkoušeného tělesa. Vyhodnocení vad v materiálu závisí na poklesu akustického tlaku. Aby se neuplatnil vliv útlumu v materiálu, provádí se měření srovnávací metodou (měřením na místě bez vad). Průchodová metoda nedokáže lokalizovat přesnou polohu vady v materiálu, dokáže pouze určit její výskyt. U průchodové metody se nevyskytuje jev mrtvé zóny⁷, což je jeho značná výhoda.

⁷ Jev mrtvé zóny - je to jev, který brání zjištění vady těsně pod povrchem.

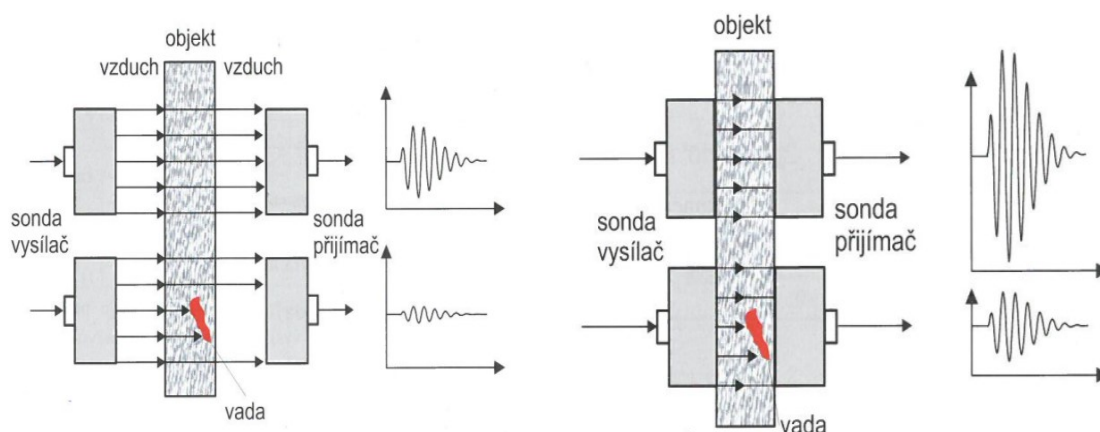
Odrázová metoda

Odrázová metoda obsahuje většinou pouze jeden měnič, který slouží jako vysílač a zároveň přijímač. Metoda je založena na zjišťování vad pomocí odrazu vlnění zpět k měniči. Výhodou odrazové metody je schopnost lokalizace místa vady. U této metody se vyskytuje jev mrtvé zóny.

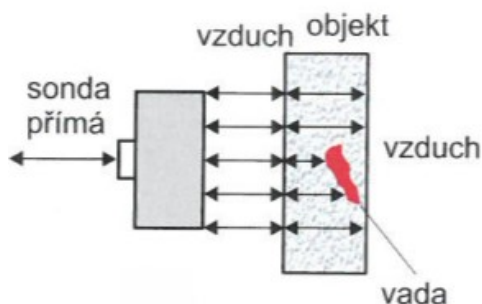
Dále se ultrazvuková defektoskopie dělí podle toho, jakou vazbu má měnič se zkoušeným povrchem na:

- kontaktní – mezera mezi sondou a zkoušeným tělesem se vyplňuje, tzv. vazebným prostředím, která vyplňuje nerovnosti materiálu (Obr. 3.26). Jako vazebné prostředí lze použít kapalinu například voda, olej nebo vazelína,
- bezkontaktní – bezkontaktní ultrazvuková metoda (Obr. 3.26) se musí provádět v kapalném prostředí, protože vzduch vede špatně ultrazvuk.

Jednotlivé ultrazvukové metody lze mezi sebou kombinovat například odrazová metoda kontaktní nebo bezkontaktní, anebo průchodová metoda kontaktní nebo bezkontaktní (Obr. 3.27). V letectví se používá nejčastěji odrazová kontaktní ultrazvuková metoda.



Obr. 3. 26 Bezkontaktní průchodová metoda (vlevo) a kontaktní průchodová metoda (vpravo) [12]



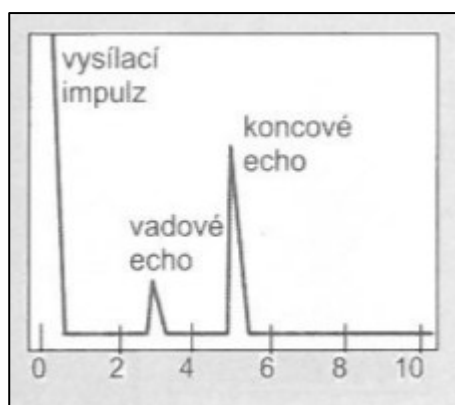
Obr. 3.27 Bezkontaktní odrazová metoda [12]

3.3.5 Zobrazování ultrazvukového signálu

Při zobrazování ultrazvukového signálu se používá několik typů zobrazení například A, B, C, D, S.

Zobrazení typu A

Jedná se o základní typ zobrazení, ze kterého následně vycházejí další typy zobrazení. Signály, které tento přijímač zaznamená, jsou zobrazeny na monitoru jako impulzy na časové ose (Obr. 3.28). Na monitoru se ukazuje jak koncový signál (odraz od zadního povrchu zkoušeného tělesa), tak signál vady. Při vyhodnocování výsledků jsou důležité zkušenosti pracovníka, který zkoušku provádí, aby rozeznal, zda monitor ukazuje koncový signál nebo signál vady.



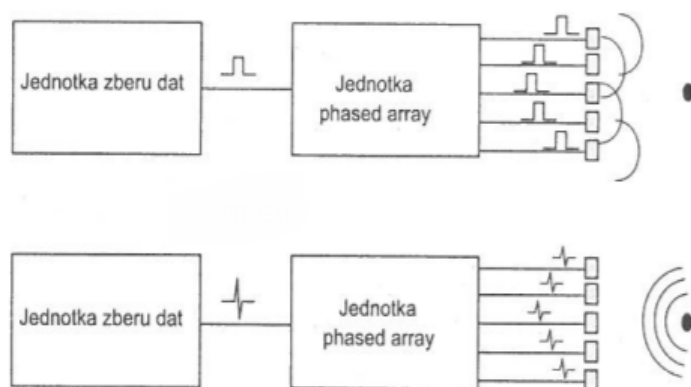
Obr. 3.28 Schéma signálu [12]

3.3.6 Technika Phased array

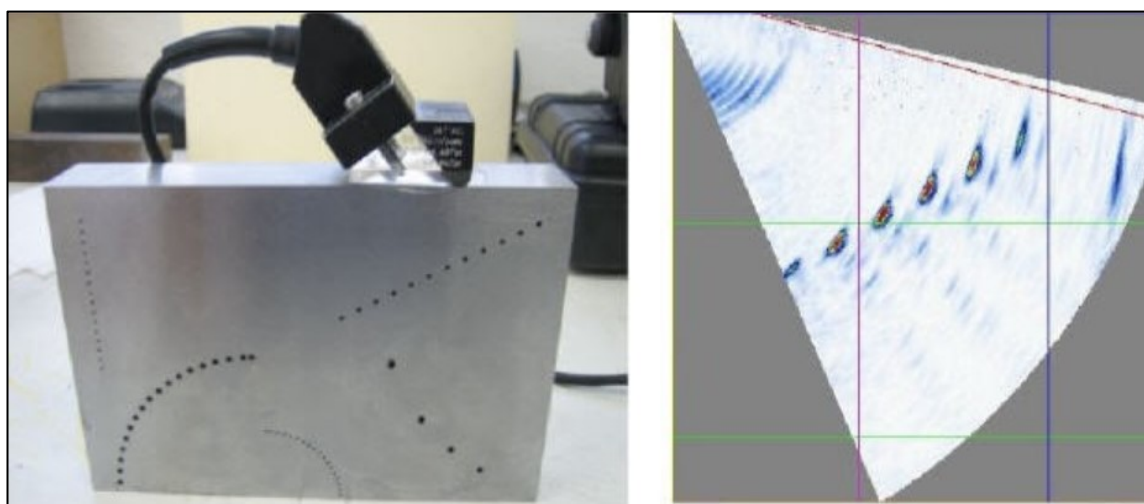
Každá defektoskopická metoda se snaží vyvíjet, tak aby se stala co nejefektivnější, a jinak tomu není ani u ultrazvukové defektoskopické metody. Technika Phased array je pokročilá metoda ultrazvukového zkoušení (Obr. 3.30). Tato technika vznikla v 90.

letech 20. století. Ve svých začátcích technika nebyla příliš dostupná, protože pořizovací cena byla velmi vysoká. V dnešní době je hojně využívána, proto i její cena klesla na přijatelnou hodnotu.

Phased array sonda se skládá z mnoha malých ultrazvukových měničů (Obr. 3.29). Každý měnič vytváří své vlastní vlnění. Materiálem prochází větší množství vlnění, což je výhodné z hlediska vyhodnocování. Informace z každého vlnění se vyhodnocuje dohromady, a proto se při vyhodnocování vytváří vizuální obraz, který znázorňuje řez zkoušeného materiálu. V tomto řezu je přesně určená poloha a velikost vady. Technika Phased array se využívá hlavně u geometricky složitějších předmětů.



Obr. 3.29 Vysílání (vlevo) a příjem (vpravo) signálu při technice Phased array [12]



Obr. 3.30 Phased array [14]

3.4 Magnetická prášková metoda

Magnetická prášková metoda, také známá pod názvem metoda rozptylových toků, využívá rozptylu magnetických toků nad trhlinou. První zmínky o této metodě sahají až do roku 1868. V tomto roce S. M. Saxby navrhl, aby se ocelové hlavně děl a pušek zkoušeli magneticky. Zkoušení nemělo příliš úspěch, proto se zprvu tato metoda nevyužívala. Až v roce 1912, americký fyzik C. W. Burrowsen navrhl myšlenku, aby se vedle mechanického zkoušení, začala využívat magnetická prášková metoda. Průmyslové využití magnetické metody zavedli páni V. de Forest a F. Doane roku 1929. Zajímavostí je, že na rozvoji magnetické práškové metody se podílel také český Ing. Karásek, který vyvinul řadu magnetizačních zařízení pod názvem INKAR.

Magnetická prášková metoda je principiálně velmi jednoduchou metodou, která využívá vlastnosti magnetických polí. Základním principem metody je zachycení rozptylových polí, která vzniknou nad vadou. Nejčastěji se používá k zjišťování povrchových vad nebo vad, které jsou v blízkosti povrchu (zhruba do hloubky 6 mm). Magnetická prášková metoda se od kapilární metody příliš neliší, proto také mají podobné výhody a nevýhody použití. Magnetická prášková metoda má však oproti kapilární metodě jednu značnou nevýhodu a to takovou, že tato metoda se může používat pouze u feromagnetických materiálů. Výhodou magnetické práškové metody je její jednoduchost, snadná obsluha, malé nároky na přípravu povrchu a možnost automatické.

3.4.1 Základy magnetismu

Magnetická prášková metoda pracuje s vlastnostmi magnetických polí. Veškeré informace o magnetických polích jsou popsány v příloze č. 3.4.

3.4.2 Způsoby magnetizace

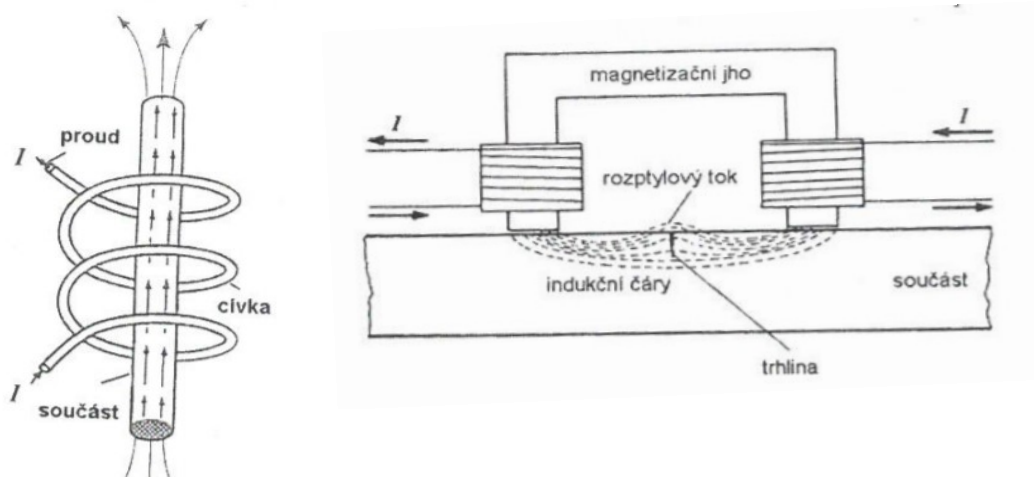
Pro vytvoření rozptylového magnetického toku nad vadou je nutno zkoušený předmět zmagnetizovat. Magnetizace předmětu musí být dostatečně velká, aby se vytvořil rozptylový tok nad vadou (Obr. 3.33). Vady, které jsou orientovány rovnoběžně vůči toku, se nezaznamenají. Proto je důležité, aby magnetizace probíhala kolmo vůči předpokládané vadě. Pokud kolmost není možno zaručit, používá se více způsobů magnetování, aby se vytvořil směr toku, co nejkolmější vzhledem k vadě. V dnešní době rozeznáváme dva způsoby magnetizace [1]:

- magnetizace pólová,
- magnetizace cirkulární.

Pólová magnetizace

Při magnetování předmětu pólovou magnetizací vzniká magnetické pole, jehož magnetický tok prochází kontrolovaným předmětem, ale i mimo něj. Zmagnetování se děje dvěma způsoby:

- cívkou – při této magnetizaci se zkoušený předmět vsune do cívky, kterou prochází proud (Obr. 3.31) a cívka má v tomto případě kotoučový tvar,
- magnetizačního jho – zkoušený předmět nebo jeho část se umísťuje mezi póly magnetizačního jha a stává se součástí magnetického obvodu⁸ (Obr. 3.31). Magnetické pole prochází od jednoho pólu k druhému a předmět je magnetován. Magnetizační pole jho může být vybuzeno cívkami (protéká jimi proud), které jsou na jhu, anebo pomocí permanentního magnetu. [1]

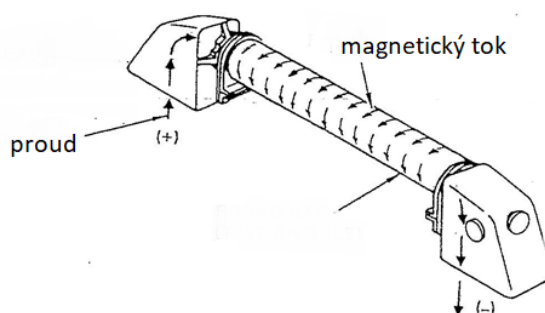


Obr. 3.31 Pólová magnetizace cívkou (vlevo) a pomocí magnetizačního jho (vpravo) [1]

⁸ Magnetické obvody - magnetické obvody jsou tvořeny uzavřenou magnetickou křivkou magnetického toku, znázorněnou magnetickými indukčními čarami. Obvod může být otevřený nebo uzavřený.

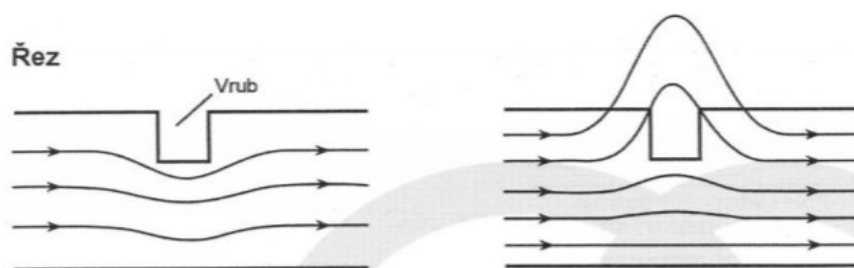
Cirkulární magnetizace

Magnetický tok je uzavřen ve zkoušeném předmětu tzn., že magnetický tok nevystupuje z předmětu do prostoru (Obr. 3.32). Cirkulární magnetizace vzniká přímým průchodem proudu kontrolovaným předmětem.



Obr. 3.32 Přípravek pro cirkulární magnetizaci [1]

Jednotlivé typy magnetizace se můžou kombinovat. Tyto kombinace umožní zjistit ve výrobku vadu v libovolné prostorové orientaci.



Obr. 3.33 Nedostatečně (vlevo) a dostatečně zmagnetovaný předmět (vpravo) [15]

3.4.3 Princip vzniku magnetického toku nad vadou

Je-li zkoušený předmět zmagnetován, prochází jím magnetický tok, který je charakterizován magnetickými siločárami. Tyto siločáry nemohou být přerušeny, ale mohou být pouze vychýleny ze svého směru. To se děje tehdy, pokud se ve zkoušeném předmětu vyskytuje vada. Vada v materiálu má jiné magnetické vlastnosti. Má mnohem vyšší magnetický odpor než zkoušený předmět, protože v trhlině se vyskytuje vzduch s vyšším magnetickým odporem. Velikost výchylky magnetických čar závisí na velikosti magnetizace předmětu a na hloubce výskytu vady. Pokud je předmět dostatečně zmagnetovaný, nebo se vada nachází v dostatečné blízkosti povrchu, potom magnetické siločáry vystoupí nad povrch vady v dostatečném množství. Tento jev se nazývá rozptyl

magnetického toku, který je nositelem informace výskytu vady (Obr. 3. 33). Pod vadou se siločáry zhušťují. Po překlenutí vady se magnetické siločáry opět šíří předmětem ve stejném směru.

3.4.4 Detekční prostředky magneticky práškové metody

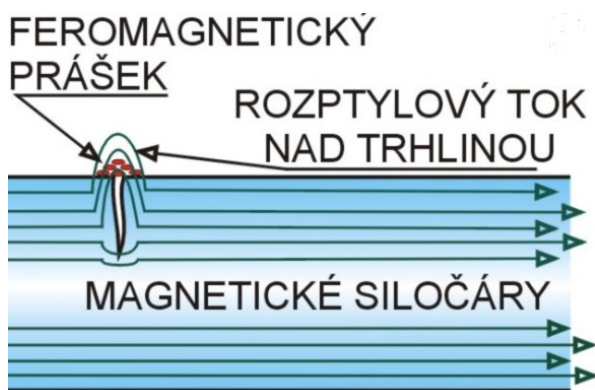
Při zjišťování rozptylu magnetického toku nad vadou se používají dva typy detekčních prostředků – pomocí feromagnetického prášku nebo pomocí magnetických detekčních sond.

Feromagnetický prášek

Feromagnetický prášek (Obr. 3.34) musí mít vysokou permeabilitu (nad 1), aby se dal snadno zmagnetovat. Musí mít také nízkou koercivitu⁹. Prášek musí mít dostatečně zrnitý, protože zrnitost ovlivňuje výsledek zkoušky. Příliš velká zrna se neudrží nad vadou a malá zrna mohou vadu vyplnit. Indikace pomocí prášku lze rozdělit na barvenou a fluorescenční. Feromagnetický prášek se nanáší buď pomocí štětce (suché prášky) nebo pomocí kapalné suspenze. [16]

Magnetické detekční sondy

Magnetické detekční sondy se nejčastěji používají při automatizované kontrole, což urychluje proces vyhodnocování. Sondy mají za úkol naskenovat povrch zkoušeného předmětu, pomocí manipulačních zařízení. Proto se tyto sondy nejčastěji využívají při zkoušení tyčí, rour apod. Magnetická sonda může být tvořena, cívkou, feromagnetickou sondou nebo Hallovou sondou (nejvýhodnější).



Obr. 3.34 Detekce feromagnetickým práškem [17]

⁹ Koercivita - schopnost látky nezůstat zmagnetovaný po ukončení magnetizace. Koercivita se měří přístrojem označovaný jako koercimetr.

3.4.5 Testovací zařízení

Před zahájením testování, se musí provést kontrola, zda průběh zkoušky je správný. K tomuto ověření se používají takzvané měrky. Pomocí měrek lze určit citlivost zkoušky, neboť měrky jsou opatřeny necelistvostmi, které napodobují vadu. Každá vada má odlišnou hloubku. Měrek je několik druhů, ale nejpoužívanější je Bertholdova měrka (Obr. 3.35). Pomocí této měrky kontrolujeme směr, intenzitu magnetizace, ale i jakost povrchu. Bertholdova měrka se pokládá na zkoušený kus v místě, kde bude probíhat zkouška. Dalším typem měrky je měrka ASTM (Obr. 3.35), která se od Bertholdovy měrky liší pouze počtem necelistvostí na ocelovém válečku. [1]



Obr. 3.35 Bertholdova (horní) a ASTM měrka (dolní)

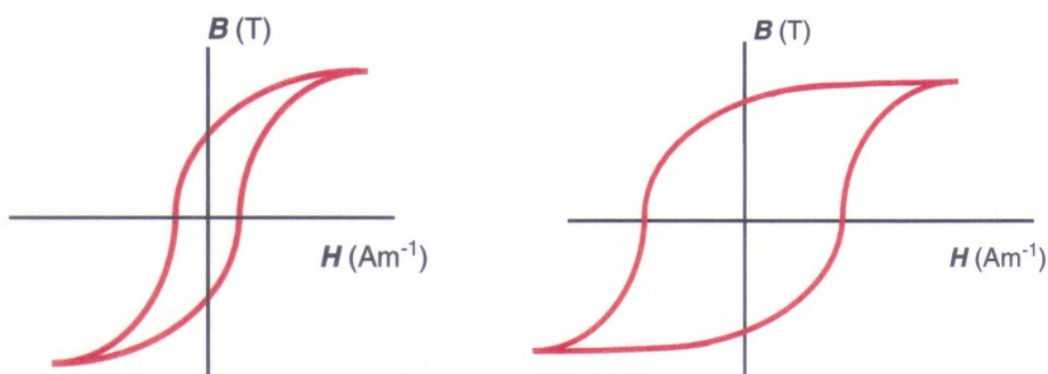
3.4.6 Odmagnetování

Po ukončení magnetické zkoušky je nutné, aby došlo k odmagnetování předmětu, neboť ve zkoušeném předmětu zůstává zbytková indukce. Odmagnetování předmětu je důležité z několika důvodů:

- způsobuje přitahování drobných nečistot,
- zmagetované díly vytlačují elektrický oblouk,
- ovlivňují přesnost dalších měřících zařízení. Odmagnetování se děje několika způsoby,
- pomocí vnějších střídavých polí s klesající amplitudou,

- přepínáním polarity stejnosměrného proudu, jehož hodnota se postupně snižuje až k nule.

Práce, kterou je potřeba vykonat, aby se předmět odmagnetoval, závisí na obsahu hysterezní křivky (Obr. 3.36). Čím je větší obsah hysterezní křivky, tím větší práci je nutné vykonat, aby se feromagnetická látka dostala do původního stavu. Podle obsahu lze rozdělit hysterezní křivku na úzkou a širokou. Úzkou hysterezní křivku mají magnetické měkké látky například slitiny železa s křemíkem a širokou mají magnetické tvrdé látky například slitiny oceli a chromu.

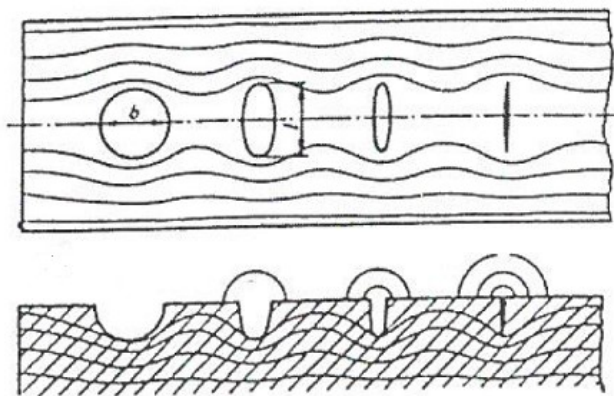


Obr. 3.36 Hysterézní křivka magnetických měkkých látek (vlevo) a magneticky tvrdých látek (vpravo) [18]

3.4.7 Hodnocení zkoušky

V některých případech dojde k nezaznamenání vady v důsledku:

- špatné orientace vady vůči magnetickému toku – magnetický rozptylový tok se vytvoří pouze tehdy, je-li orientace magnetického pole kolmá na vadu a v praxi je tolerovaná odchylka až 45° ,
- umístění vady – nejvýraznější rozptylový tok vzniká těsně pod povrchem, v tomto případě je vada dobře lokalizovatelná a s klesající hloubkou se vada stává nevýraznou a těžko odlišitelnou od rušivých elementů,
- tvarem vady – největší rozptylový tok vzniká nad dlouhou úzkou vadou a nejmenší u vady, která má kulový tvar (Obr. 3.37).



Obr. 3.37 Závislost velikosti rozptylového toku na tvaru trhliny [1]

Při zkoušení magneticky práškovou metodou, se hodnocení vad provádí ihned po nanesení detekčního prostředku. Hodnocení se provádí vizuálně. Zjištěná indikace se porovnává s předepsanými normami a toto porovnání určí, zda zkoušený předmět vyhovuje normě či nikoliv. Tyto normy předepisují přípustné rozměry indikace.

V některých případech může vzniknout magnetický rozptylový tok nad nerovnostmi povrchu. V těchto případech hovoříme o nepravé indikaci. Příčinou může být – náhlá změna magnetických vlastností povrchu, vlivem vyskytujících se nečistot, nadměrná magnetizace zkoušeného předmětu, změna struktury materiálu.

Řada nepravých indikací zmizí po odmagnetování kontrolovaného předmětu. Pokud by se nepravé indikace objevovaly i nadále, je potřeba zvolit jinou nedestruktivní metodu, pro určení skutečného stavu kontrolovaného předmětu.

3.5 Termografická metoda

Termografická metoda využívá faktu, že každé těleso vyzařuje do prostoru teplo v podobě infračerveného záření. První zmínky o infračerveném záření byly už v roce 1800, kdy astronom William Herschel prováděl experimenty se slunečním světlem. Během těchto experimentů používal krystal, který dokázal rozložit sluneční paprsky do jednotlivých teplotních úrovní. Herschel si všimnul toho, že při přechodu z červené oblasti do oblasti pod ní, se rapidně teplota zvýší. Záření, které se vyskytuje pod červenou oblastí, nazval temné záření. Temné záření, dnes známé jako infračervené záření, je část elektromagnetického spektra. Další důležitý objev se uskutečnil v roce 1829, kdy fyzik Leopold Nobil vynalezl termočlánek, který byl předchůdcem dnešních moderních termometru. Zajímavostí je fakt, že první infračervený snímek (termogram) zhotovil syn

William Herschla. Až v 70. letech minulého století se začala termografie využívat pro zjišťování napětí v materiálu.

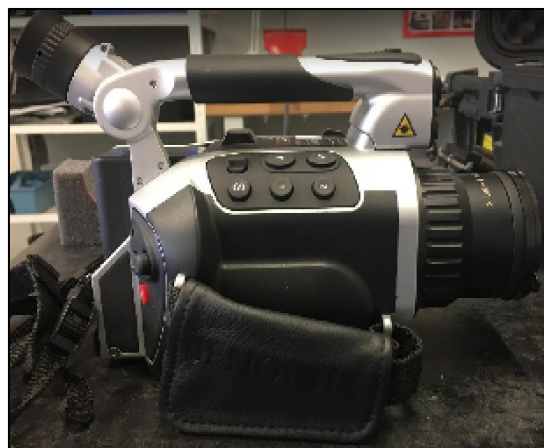
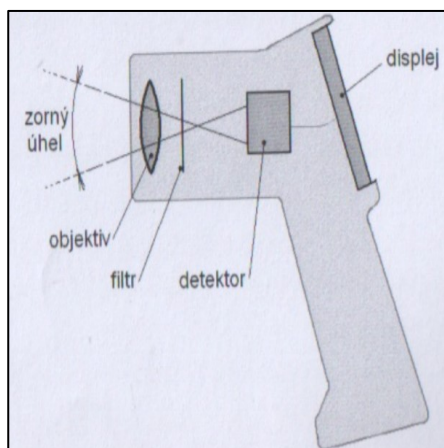
Jak už bylo zmíněno, termografie využívá tepla, které vyzařuje povrch tělesa do prostoru. Vada na povrchu tělesa ovlivňuje rozložení vyzářeného tepla do prostoru. Rozdílné rozložení teplot na povrchu, je registrováno pomocí termokamery. Pomocí termografie jsme schopni detekovat povrchové vady a vady, které leží těsně pod povrchem. V leteckém průmyslu se tato metoda využívá nejčastěji ke zkoušení kompozitních materiálů. Využívá se zejména u konstrukce letadel, kde kompozitní materiál tvoří více než 30% draku. Jedná se o bezkontaktní metodu, která má své výhody, ale také nevýhody. Při zjišťování teploty povrchu bezkontaktně ovlivňují měření plyny a jiné páry, ale také teplota okolního prostředí. Před zkouškou je třeba pečlivě upravit zkoušený povrch, protože jakékoliv znečištění ovlivní naměřené hodnoty. Velkou výhodou této metody je rychlé zhodnocení skutečného stavu velké plochy zkoušeného předmětu. Zkoušku lze provádět v těžko přístupných místech a dokáže určit stav předměty se složitým povrchem.

3.5.1 Infračervené záření

Termografická metoda využívá část elektromagnetického spektra, které je rozděleno do několika skupin vlnových délek. Termografická metoda využívá jednu skupinu vlnové délky (infračervené vlnění). Vlastnosti infračerveného vlnění (záření) je popsáno v příloze č. 3.5.

3.5.2 Termokamera

Termokamera je zařízení, které se využívá pro zjištění teplot na povrchu zkoušeného předmětu. Při měření je třeba počítat s tím, že naměřené hodnoty mohou být zkreslené. Je to způsobené tím, že termokamera měří teplo, které je vyzářené samotným zkoušeným tělesem, ale také měří vlnění, které je odražené tělesem. Toto odražené vlnění způsobuje zkreslení měření. Aby se snížilo zkreslení měření, je důležité, aby pracovník znal parametry zkoušeného materiálu. Termokamera se skládá z objektivu (čočka), spektrálního filtru, detektoru, displeje, skenovacího optika (Obr. 3.38). Čočka musí být vyrobena z Germania, protože běžné sklo nepropouští infračervené záření. Infračervené záření směřuje přes spektrální filtr na detektor, který dokáže registrovat toto záření. Detektor vytvoří poté na displeji obraz neboli termogram.



Obr. 3.38 Schéma termokamery (vlevo) a termokamera v provozu (vpravo) [20]

Výběr termokamery

Při výběru termokamery je nutné, aby personál zohlednil tyto parametry:

- rozsah měřených teplot – udává teplotní rozmezí, ve kterém je kamera schopna spolehlivě měřit,
- spektrální citlivost detektoru – množství záření, které je detektor schopný zachytit,
- teplotní citlivost – je to nejmenší teplotní změna, kterou je termokamera schopna zaznamenat.

3.5.3 Postup provádění zkoušky

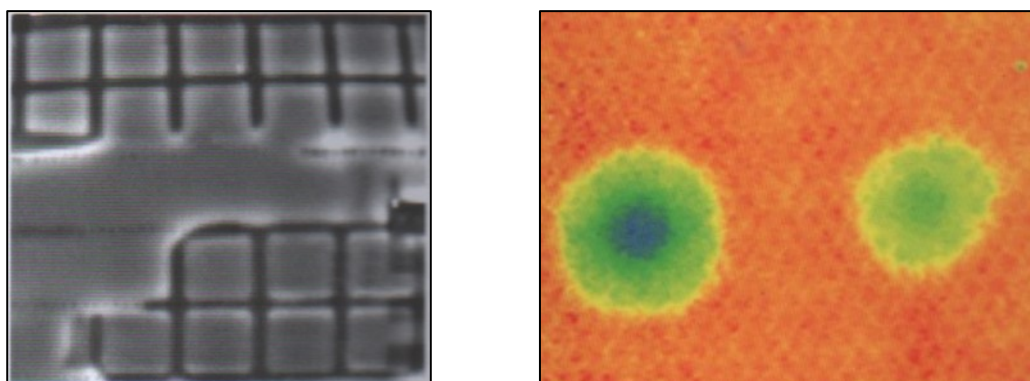
Před tím, než začneme provádět zkoušku, je nutné termokameru zkalibrovat. Kalibrace se děje pomocí černého tělesa. Po kalibraci přístroje je důležité nejprve odstranit z povrchu různé nečistoty. Pokud je povrch zbavený nečistot, následuje vizuální kontrola povrchu. Všímáme si především různého zbarvení povrchu a jeho kvality. Tyto vlastnosti povrchu nám mohou napovědět, že se v místě může vyskytovat vada. Při vizuální kontrole je důležité, aby si personál určil záchytný bod, který pomáhá k lepší orientaci na zkoušeném povrchu. Po samotné vizuální kontrole následuje měření pomocí termokamery (Obr. 3.39). Pokud termokamera zaznamená teplotní anomálii, je nutné přesně označit hranice této teplotní anomálie. Ohraničení se děje pomocí křídly. Po provedení zkoušky je důležité, aby měření bylo zapsáno do protokolu.



Obr. 3.39 Průběh termografické zkoušky [21]

3.5.4 Aplikace termografie v letectví

Termografie se v leteckém průmyslu používá hlavně u kompozitního materiálu, a to především k zjišťování vody (zmrazků) ve voštinách nebo k zjištění delaminace (Obr. 3.40). Ve většině případů se termografie využívá na horizontálním stabilizátoru, směrovém kormidlu a na vztlkových klapkách.



Obr. 3.40 Kontrola neslepení (vlevo) a zmrzlá voda ve voštině (vpravo) [20]

3.6 Radiografická metoda

Radiografická metoda též známá jako metoda prozařovací. Patří mezi nejsložitější a nejnebezpečnější nedestruktivní zkoušku, která je v leteckém průmyslu využívána. U této metody je velice důležité dodržovat striktně předepsané postupy a normy, neboť využívání prozařovací metody, může mít negativní dopad na lidský organismus.

Základem této metody je záření, které dokáže pronikat hmotou. Záření objevil fyzik W. C. Röntgen v roce 1895 a pojmenoval ho jako záření X, které je v dnešní době známější pod názvem rentgenové záření. Záření X velice ovlivnilo lékařství, fyziku a také atomistiku¹⁰. V roce 1898, tento vědec zavedl označení měkkých a tvrdých paprsků, které dokážou pronikat hmotou v závislosti na váze atomových jader. Rentgenové záření je zaznamenáno pomocí technických rentgenogramů. V roce 1913 sestrojil W. D. Coolidge rentgenku se žhavou spirálou na katodě, která ovlivnila zkoušení pomocí radiografické metody. V roce 1928, pan Berthold začal zkoušet materiály radiografickou metodou a otevřel tak cestu k dnešní moderní radiografické defektoskopii.

Radiografická metoda využívá fyzikálních procesů, u kterých dochází k pohlcování ionizujícího záření, které prochází hmotou. Každý materiál má odlišnou pohlcovací schopnost. Záření je vlastně energie šířící se prostorem a může se šířit prostřednictvím elektromagnetického vlnění¹¹ (rentgenové záření a gama záření). Prozařovací metoda se využívá k zjišťování vnitřních objemných vad (až do hloubky cca 100 mm). Při zkoušení touto metodou není nutné brát zřetel na to, o jaký druh materiálu se jedná, protože dokáže zkoušet kovové i nekovové materiály, což je značná výhoda. Hlavní výhoda je schopnost odhalení téměř veškerých vnitřních vad předmětu, v důsledku možnosti prozáření celého jeho průřezu. Vybavení pro vykonání prozařovací zkoušky bývá často nepřenosné a kvůli bezpečnosti je nutné, aby zkoušený předmět byl umístěn v místnosti, kde jsou stěny z olova. Olovněné stěny zabraňují šíření záření z místnosti, jenž je pro lidský organismus nebezpečný. Nevýhodou tedy této metody je, že musí disponovat speciálním vybavením a pomůckami, které značně zvyšují finanční náročnost zkoušky.

3.6.1 Základy elektromagnetického záření

Stejně jako u termografické metody, tak i radiografická metoda využívá část spektra elektromagnetického záření – rentgenové záření a gama záření. Elektromagnetické vlnění je popsáno v příloze č. 3.6.

3.6.2 Druhy záření

Elektromagnetické spektrum je tvořeno mnoha elektromagnetickými zářeními, přičemž v radiografické defektoskopie se využívají pouze dvě záření – rentgenové a gama záření. Tyto dvě záření se od sebe liší původem vzniku, ale také schopnosti

¹⁰ Atomistika - je to fyzikální směr, který se zabývá studiem elektronového obalu atomu.

¹¹ Elektromagnetické vlnění - je příčné postupné vlnění elektromagnetického pole.

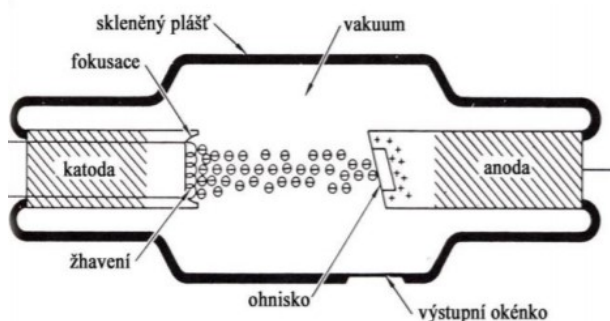
pronikat hmotou. Rentgenové záření a gama záření budou podrobněji popsány v další části textu.

Rentgenové záření

Rentgenové záření, též známé jako záření X, je elektromagnetické vlnění, o krátké vlnové délce. Čím kratší vlnová délka, tím má vlnění větší energii, a tudíž dokáže pronikat materiálem o větší tloušťce. Rentgenového záření vzniká zpomalováním nabitých částic (elektronů). Vyzařování rentgenového záření se děje za pomoci rentgenky. Rentgenka potřebuje pro vytvoření rentgenového záření zdroj elektronů, zařízení pro urychlení elektronů a terčík pro zbrzdění urychlených elektronů.

Vznik rentgenového záření

Rentgenové záření vzniká uvnitř skleněné trubice (rentgenky) (Obr. 3.41), ve které je vakuum. Uvnitř trubice je katoda (záporný pól) a anoda (kladný pól), mezi kterými je vysoké napětí. Katoda je vytvořena z rozžhavených wolframových vláken, které produkují elektrony. Anoda je opatřena wolframovým terčíkem. Vysoké napětí mezi katodou a anodou urychlí elektrony na vysokou rychlost. Urychlené elektrony dopadají na wolframový terčík a vlivem kinetické energie elektronů se při tomto dopadu uvolní do prostoru teplo (z 99%) a pouze 1% rentgenového záření. Z důvodu velkého množství vyzářeného tepla musí být anoda chlazena (vodou nebo vzduchem). Intenzita rentgenového záření závisí na počtu elektronů, které dopadají na terčík, a také na velikost napětí mezi katodou a anodou.

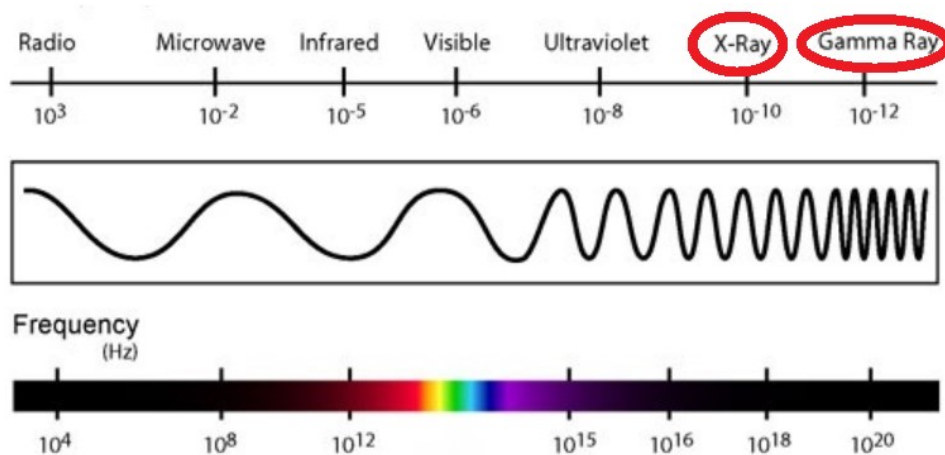


Obr. 3.41 Schéma rentgenky [1]

Gama záření

Gama záření má mnohem kratší vlnovou délku (větší energii) než rentgenové záření (Obr. 3.42). K vysílání záření se využívají gama zářič. Zářiče pracují s radionuklidy.

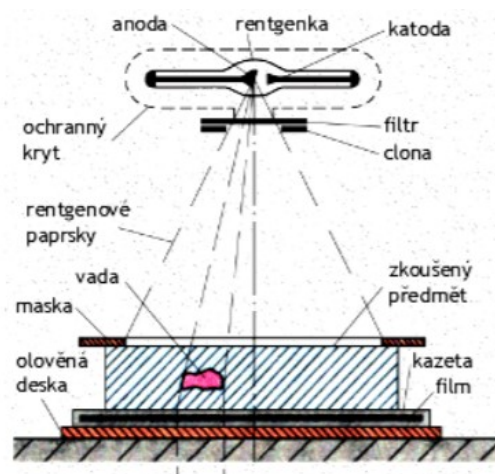
Radionuklidy jsou prvky, které se stanou nestabilními, pokud je zaktivujeme pomocí jiného prvku například Kobaltu. Tato nestabilita způsobí samovolné rozpadání atomových jader. Při tomto rozpadu se uvolní gama záření. Aktivace se děje uvnitř zářiče. Radionuklid je charakterizován poločasem rozpadu tzn. počtem rozpadů atomů za sekund. Hlavní nevýhodou gama záření je neschopnost regulovat množství gama záření, které se uvolňuje do prostoru.



Obr. 3.42 Elektromagnetické spektrum rentgenového záření a gama záření [19]

3.6.3 Princip využití záření

Jak už bylo vysvětleno výše, rentgenové a gama záření proniká hmotou. Záření pronikající hmotou se zeslabuje, ovšem při průchodu vadou méně (Obr. 3.43). Záření pronikající hmotou je nutné zaznamenat. Zaznamenávají se dopadající fotony (kvanta energie), které dopadají na radiografický film, na němž se vykreslí průběh záření. Pokud se ve zkoušeném materiálu vyskytuje vada, na filmu se vada znázorní tmavěji než okolní prostředí. Vada je tmavší v důsledku možnosti průchodu většího množství fotonů (energie) než okolním materiálem. Zobrazuje se pouze záření přímočaré (primární záření), tj. po spojnici zářič – výrobek – film. Vada, kterou projde záření, vytváří rušivé druhotné záření. Při zkoušení se snažíme, aby na film dopadlo pouze primární záření.



Obr. 3.43 Princip radiografické metody [3]

3.6.4 Volba záření

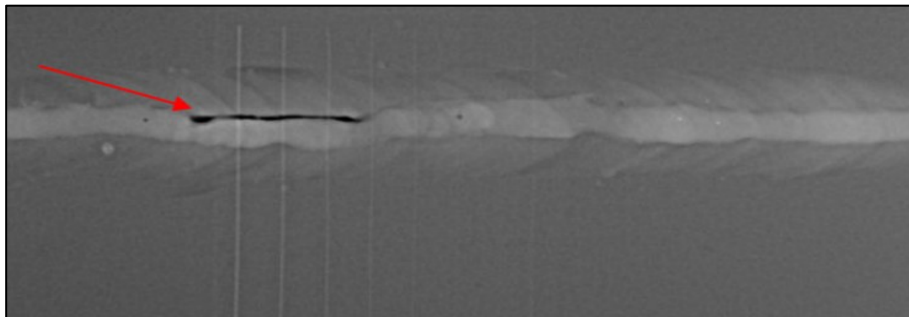
Při rozhodování o použití rentgenového záření nebo gama záření pro prozařovací zkoušku, je velmi důležité, vzít v úvahu výhody a nevýhody zářičů a rentgenky. Zářiče mají mnohem nižší pořizovací cenu než rentgenky a také nepotřebují zdroj elektrické energie, což snižuje náklady na provoz. Gama záření lépe prozařuje duté předměty. Rentgenové záření je možno regulovat tzn., přerušit záření a možnost zastavení pronikání záření hmotou, což je značná výhoda oproti záření gama. Rentgenové záření má také mnohem lepší kontrast s radiografickým filmem. V prozařovací defektoskopii se preferuje volba rentgenového záření kvůli možnosti regulace. [1]

3.6.5 Radiografický film

Radiografický film je vlastně několikavrstevná detekční látka, která zaznamenává dopad fotonů. Látka musí dobře reagovat s fotony. Film se skládá z nosné fólie, oboustranného emulzní vrstvy (je tvořena z želatiny a zrn stříbra) a oboustranné ochranné vrstvy (chrání emulzní vrstvu). Vlastnosti filmů jsou charakterizovány pomocí křivky zčernání. Křivka zčernání zahrnuje citlivost filmu na záření a gradaci (filmový kontrast). Radiografické filmy lze rozdělit podle nosné fólie, na tři typy – kovové, fluorescenční a fluorometalické.

Jakmile záření (energie fotonů) dopadne na zrna stříbra, nastanou v nich určité fotochemické změny, které vedou ke vzniku, tzv. latentního obrazu. Aby tento obraz ukázal černá místa, je třeba ho vystavit působením světla a vývojky. Velikost zčernání

místa závisí na množství dopadající energie na zrna stříbra (Obr. 3.44). Proces vyvolávání je prováděn v temné komoře. [1]



Obr. 3.44 Radiografický snímek s podélnou vadou ve svaru [3]

3.6.6 Hodnocení zkoušky

Hodnocení radiografického snímku je souhrn dat, která po zpracování určí kvalitu výrobku. Známe tři úrovně vyhodnocování:

- nominální úroveň – u této úrovně hodnocení hodnotíme pouze to, zda se na snímku objevuje vada či nikoliv,
- ordinální úroveň – při nález vady dochází k porovnávání se vzorovými nálezy nebo s atlasem srovnávacích obrazů,
- metrická úroveň – stanovuje se geometrický charakter vady například jeho velikost nebo poloha.

Pokud nominální úroveň neodhalí žádnou vadu, neprovádí se další úrovně. Při zjištění vady první úrovní, následují další úrovně a všechna zjištěná data jsou zaznamenány do protokolu o zkoušce.

U prozařovací zkoušky je velice důležité, aby personál striktně dodržoval předepsané postupy a využíval předepsané pomůcky. Zkouška je velice nebezpečná a jakékoliv nedodržení postupu může vést k poškození lidského organismu, proto zkoušku musí provádět jen fundovaný personál.

4 Využití NDT metod na letounech B737 a A320


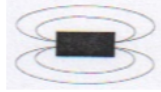
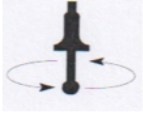

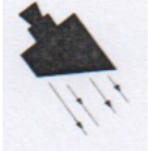


Tato kapitola bude pojednávat o využití NDT metod na Boeingu 737 a Airbus 320. Z hlediska konstrukce jsou tyto dva typy letounu velice podobné. Proto se postup prováděné práce s návazností na nedestruktivní zkoušky příliš neliší. Do pracovního postupu lze zařadit vizuální prohlídky, opravy letadlových dílců, ale co je pro tuto kapitolu nejdůležitější, je vhodný výběr nedestruktivní zkoušky.

V údržbové organizace jsou nedestruktivní metody velmi důležité, ale každá metoda má jisté omezení. Tato omezení hrají hlavní roli při výběru metody a následné zkoušce. Proto je velice důležité znát jejich přednosti a nedostatky. Správný výběr nedestruktivní metody se odvíjí také od materiálu, na kterém bude zkouška probíhat, ale také na charakteru nalezené vady. Pokud pracovník nalezne jakékoliv povrchové poškození, je nutné, poškození správně pojmenovat (identifikovat), což je často obtížné. Tato kapitola se bude touto problematikou také zabývat. Všechna zmíněná kritéria hrají velkou roli při výběru nedestruktivní zkoušky. Veškeré informace, které jsou nutné pro vhodný výběr nedestruktivní metody, budou v kapitole popsány.

Kapitola měla také zahrnovat praktickou ukázkou využití nedestruktivních metod v reálném provozu. Každá praktická ukáзка měla být doplněna o odůvodnění, proč je na daném letadlovém dílci zvolena právě tato nedestruktivní metoda a k tomuto odůvodnění měla být připojena fotografická dokumentace. Fotografická dokumentace měla mít zásadní vliv na popis a následné odůvodnění, ale vzhledem k vzniklé situaci (pandemie způsobená nemocí COVID-19) není možné fotografickou dokumentaci zajistit. Proto jsem byl nucen tento záměr změnit. Prvotní záměr byl změněn a nahrazen algoritmem pracovního postupu s návazností na nedestruktivní zkoušky. Vzniklou situaci jsem konzultoval se svým vedoucím, který změnu odsouhlasil. Algoritmus by měl seznámit studenty a školený letecký personál, jak práce s NDT v údržbové organizaci probíhá. Tento algoritmus by měl sloužit jako pomůcka k zrychlení a k zefektivnění práce v údržbové organizaci.

V letecké dokumentaci SRM (Structural Repair Manual), Job card nebo v NDT reportech, může údržbový personál narazit na tyto symboly, které charakterizují jednotlivé nedestruktivní metody. Ve většině případu se v těchto dokumentech objevují

hlavně zkratky nedestruktivních metod. Symboly a zkratky (Tab. 4.1) slouží k rychlejší orientaci v letecké dokumentaci, proto je velice praktické, je znát.

 <p>Penetrační zkouška (Penetrant (PT))</p>	 <p>Magnetická prášková zkouška (Magnetic particle (MT))</p>
 <p>Zkouška vířivými proudy (Eddy Current (ECT))</p>	 <p>Termografická zkouška (Infrared Thermography (IRT))</p>
 <p>Ultrazvuková zkouška (Ultrasonic (UT))</p>	<p>Radiografická zkouška</p> <div data-bbox="869 728 1029 840">  <p>Rentgenová zkouška (X – Ray (RT))</p> </div> <div data-bbox="869 840 1029 981">  <p>Gama zkouška (Gamma Ray)</p> </div>

Tab. 4.1 Symboly a zkratky nedestruktivního zkoušení

4.1 SRM a NDT report

4.1.1 SRM (Structural Repair Manual)

Všechny opravy je nutné provádět podle konkrétních pokynů uvedených v SRM. SRM je zhotovený výrobcem letadla a musí být schválený příslušným orgánem. V dokumentu jsou uvedeny limitní poškození. Pokud poškození přesáhne limity, je bezpodmínečně nutné, aby kvalifikovaný personál provedl danou opravu právě podle SRM. Pokud není oprava provedena podle SMR správně, může to vést často k druhé rozsáhlejší a komplikovanější opravě. Dokument obsahuje několik stovek stran, proto je pro přehlednost členěn do šesti kapitol (Tab. 4.2):

Číslo kapitoly	Název kapitoly
52	Doors
53	Fuselage
54	Nacelles/Pylon
55	Stabilizers
56	Windows
57	Wings

Tab. 4.2 Kapitoly z SRM

SRM úzce souvisí s pracovním postupem nedestruktivního zkoušení. Pokud údržbový personál odhalí povrchovou vadu, prvním krokem je zjistit, zda objevená vada spadá do limitních hodnot, a až poté následuje nedestruktivní zkouška. Proto je důležité, aby personál byl seznámen s SRM dokumentem. Letadlo jako celek je číselně rozděleno, a právě číselné rozmezí od 52 – 57 je pro dokument SRM nejdůležitější.

4.1.2 NDT report

NDT report je forma výstupu nedestruktivního zkoušení. Do tohoto dokumentu se zaznamenávají veškeré inspekční procesy, které byly na letadlovém dílci prováděny. Tento dokument je velice důležitý, ale je často podceňovaný. Je důležitý z hlediska zpětné vazby. NDT report je uchováván po celou dobu životnosti letadlového dílce, a pokud bude v budoucnu kontrolován, může být požadováno, aby personál, který prováděl inspekci, vysvětlil, co a proč je ve zprávě zaznamenáno. Dokument musí obsahovat hlavičku (Obr. 4.45), kde jsou vypsány veškeré informace o kontrolovaném dílci, typ prováděné metody a jeho nastavení. Také report musí obsahovat záznam o provedené práci, jeho vyhodnocení a v neposlední řadě fotografickou dokumentaci.

Test Subject / Identification Předmět zkoušky / Identifikace	Specification / Reference Specifikace / Reference
Test instrument / Type : Zkušební přístroj / typ :	Serial Number: Výrobní číslo:
General setting: Nastavení:	Camera alarm setting: Nastavení alarmu kamery :
	Acceptance limit: Kritéria přípustnosti:

Obr. 4.45 Hlavička NDT reportu

4.2 Porovnání nedestruktivních metod

Porovnání nedestruktivních metod může být obtížné, protože každá metoda je něčím jedinečná a navržená pro daný účel. To také znamená, že v závislosti na přednostech, potažmo nedostacích, je dále preferovaný určitý typ nedestruktivní zkoušky. V krátkosti tyto výhody a nevýhody popisuje Tab. 4.3.

Při volbě nedestruktivní metody je nutné znát několik kritérií. Mezi tyto kritéria patří:

- poloha nalezené vady – povrchové a podpovrchové vady,
- druh materiálu – feromagnetický látky, vodivý nebo nevodivý materiál,
- rychlost zkoušky,
- míra rizikovosti.

Podle polohy nalezené vady, lze nedestruktivní metody rozdělit na povrchové a podpovrchové metody. Na povrchové vady se využívá penetrační metoda, metoda vířivých proudů a magnetická prášková metoda (Obr. 4.46). Na podpovrchové vady se používají zbylé tři metody (Obr. 4.47).

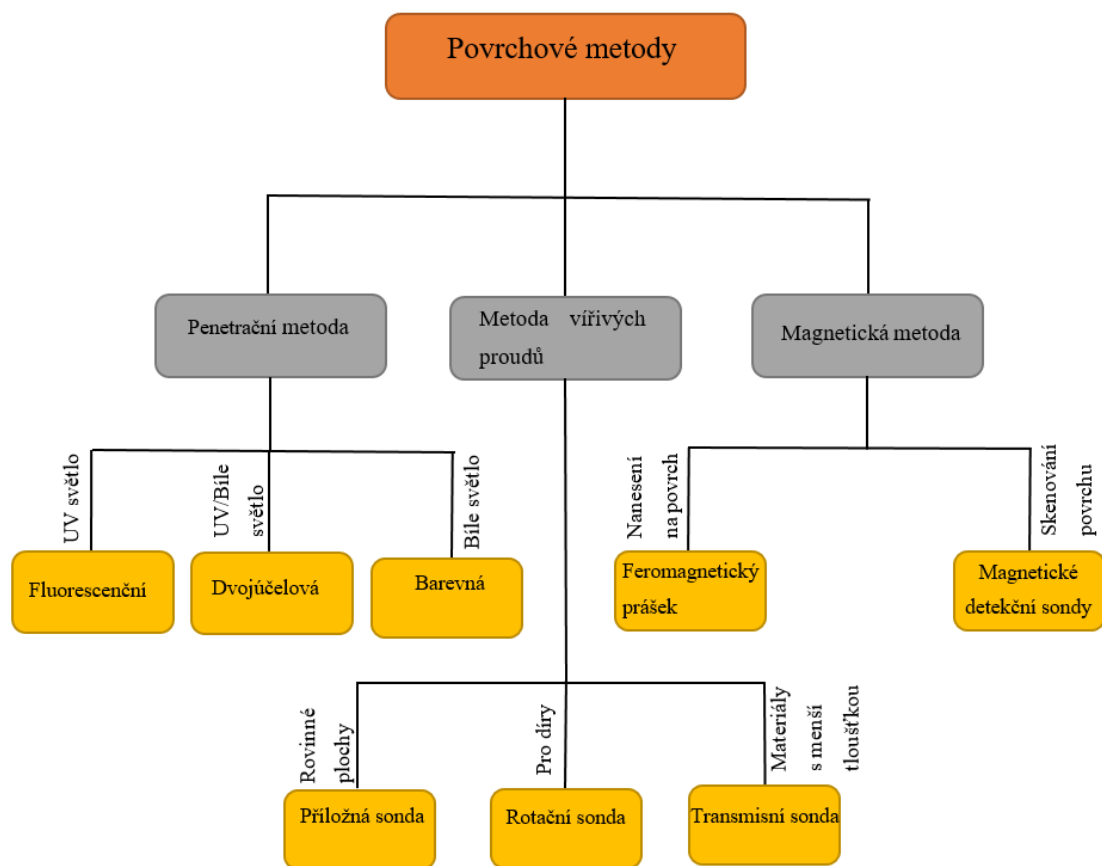
Dalším krokem pro volbu správné NDT metody, je rychlost provádění zkoušky. Nejrychlejší metody jsou takové, u kterých je možnost automatizace procesu. Naopak faktor, který zkoušku zpomaluje, je příprava povrchu. Příprava povrchu může být v některých případech zdlouhavá. Rychlost prováděné zkoušky závisí i na její obtížnosti.

Od rychlosti provádění zkoušky se odvíjí také její ekonomická náročnost. Nejvíce nákladnou metodou je radiografická metoda, naopak nejméně nákladnou je penetrační metoda, u které není potřebné drahé vybavení. V neposlední řadě, se pracovník při výběru musí dívat na to, zda je zkouška bezpečná pro lidský organismus.

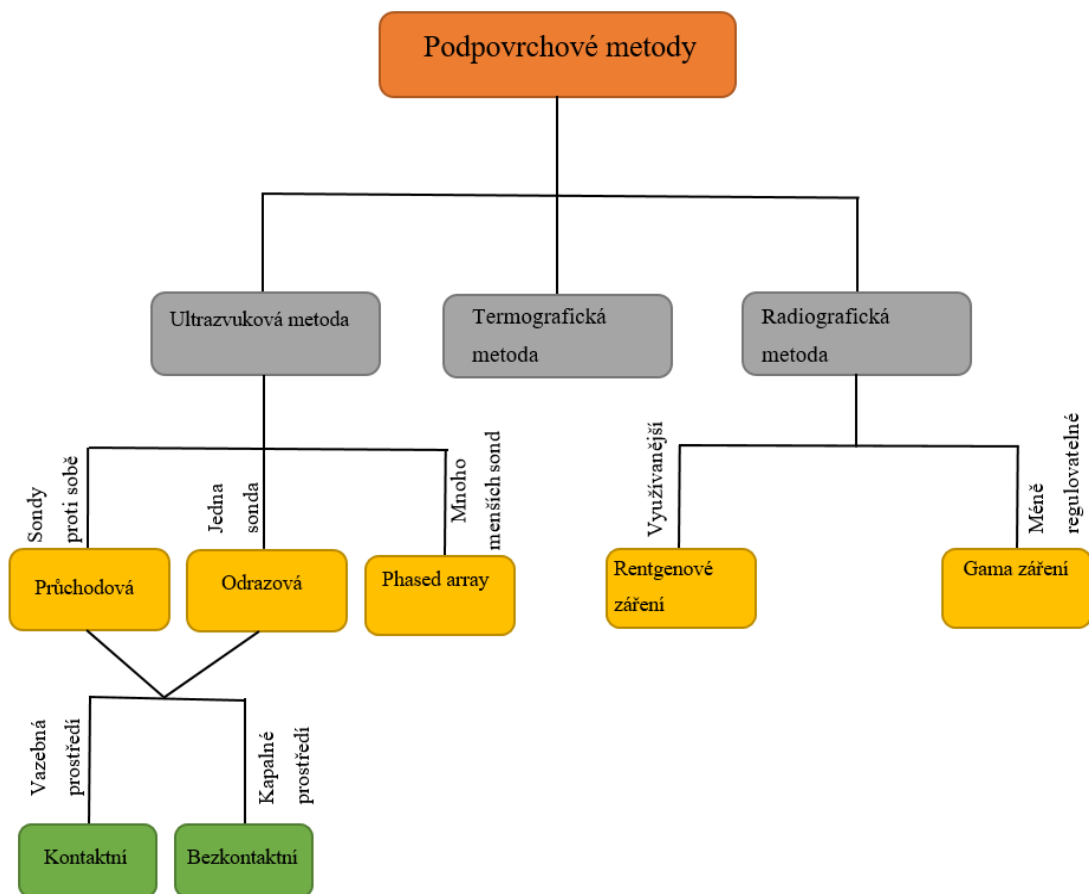
Nejvíce nebezpečná metoda je radiografická metoda. To je také jeden z důvodů, proč je v leteckém průmyslu málo využívána.

	Výhody	Nevýhody
Kapilární metoda	<ul style="list-style-type: none"> - vysoká citlivost na malé necelistvosti povrchu, - schopnost kontrolovat součásti se složitou geometrií, - principiální a aplikační jednoduchost, - nízká ekonomická náročnost, - zviditelnění necelistvosti přímo na povrchu. 	<ul style="list-style-type: none"> - neschopnost zjištění vady, která není spojena přímo s povrchem, - možné skrytí necelistvosti znečištěným povrchem, - zkouška ovlivněna drsností a porézitou povrchu, - manipulace s chemickými látkami.
Metoda vířivých proudů	<ul style="list-style-type: none"> - odhalí necelistvosti na povrchu tak těsně pod povrchem, - odpadá nutnost úpravy povrchu před zkouškou, - bezkontaktní metoda, - možnost automatizace 	<ul style="list-style-type: none"> - nelze indikovat vady umístěné hluboko pod povrchem, - velice citlivá na rozměry zkoušené součásti, - použitelná pouze u vodivých materiálů.
Ultrazvuková metoda	<ul style="list-style-type: none"> - schopnost zjistit přítomnost podpovrchových necelistvostí, ale také povrchových. Využívá se především pro podpovrchové necelistvosti. - postačí přístup ke zkoušenému předmět pouze z jedné strany - schopnost lokalizace vady - možnost automatizace 	<ul style="list-style-type: none"> - nutnost čistoty povrchu - velká citlivost na šum, který znehodnocuje výsledky měření, - nutná správná orientace vlnění, - nutnost použití přenosového média.
Magnetická prášková metoda	<ul style="list-style-type: none"> - principiálně velice jednoduchá metoda, - snadná obsluha, - možnost automatizace. 	<ul style="list-style-type: none"> - omezenost zkoušeného materiálu (pouze u feromagnetického materiálu), - nutnost zmagnetování zkoušeného povrchu, - nutnost odmagnetovat povrch po ukončení zkoušky.
Termografická metoda	<ul style="list-style-type: none"> - schopnost zaznamenat vady povrchové a podpovrchové, - bezkontaktní, - rychle provedení zkoušky, - schopnost kontrolovat velké a složité geometrické plochy. 	<ul style="list-style-type: none"> - měření ovlivnění okolním prostředím (teplotou plynů a par), - nutná úprava povrchu, - problém s orientací na zkoušeném povrchu.
Radiografická metoda	<ul style="list-style-type: none"> - zjištění absolutně všech vad materiálu, - možnost prozáření celého průřezu součásti. 	<ul style="list-style-type: none"> - provádění zkoušky je velice nebezpečné, - ekonomicky nákladná metoda, - nepřenositelné vybavení

Tab. 4.3 Porovnání nedestruktivních metody



Obr. 4.46 Schéma rozdělení povrchových metod



Obr. 4.47 Schéma rozdělení podpovrchových metod

Další kritérium, které je nutné znát při volbě nedestruktivní metody, je materiál (Tab. 4.4), na kterém se zkouška bude provádět. Některé z nedestruktivních metod jsou použitelné pouze na určitý druh materiálu. Nejvíce omezenou metodou je magneticky prášková metoda, která je využitelná pouze na materiály, které jsou feromagnetické (jsou to látky, které lze zmagnetizovat). Mezi takové materiály patří například železo a jeho slitiny. Touto metodou se v letecké údržbě nejčastěji diagnostikují propojovací piny.

Další metoda, která je materiálově omezena, je metoda vířivých proudů. Metodu vířivých proudů lze použít pouze u materiálu, který vede elektrický proud například titan, železo, hliník a jeho slitiny. Naštěstí v leteckém průmyslu je mnoho letadlových dílců, které jsou z těchto vodivých materiálů vyrobeny. Proto jen ojediněle není možné tuto metodu využít na povrchové vady, ale je třeba toto kritérium znát. Zbylé čtyři nedestruktivní metody může údržbový personál využívat bez dalších materiálových omezení.

V leteckém průmyslu se frekvence využití jednotlivých nedestruktivních metod liší. Z hlediska frekvence je možné metody rozdělit do tří kategorií – nízká, střední a vysoká frekvence.

Do kategorie nízké frekvence lze zařadit radiografickou a magneticky práškovou metodu. Jak už bylo zmíněno výše, magneticky prášková metoda je materiálově limitována, z toho důvodu není až tak využitelná. Radiografická metoda je velice spolehlivá (dokáže nalézt téměř jakoukoliv vadu), i přes to je v letectví velmi málo využívána a to proto, protože je ekonomicky náročná a také velice nebezpečná pro lidský organismus. Tato metoda je využívána jen v nezbytně nutných případech například se využívá pro kontrolu spalovacích komor nebo v oblasti centroplánu (přechod křídlo trup).

Do střední frekvence je zařazena termografická metoda, která se ve většině případu využívá pro diagnostiku vad kompozitních materiálů například zjišťování delaminace nebo při kontrole zmrazku ve voštině.

Nejčastěji využívanými metodami v leteckém průmyslu jsou metody vířivých proudů, kapilární metoda a ultrazvuková metoda. Kapilární metoda a metoda vířivých proudů má v letectví podobné uplatnění, ale upřednostňuje se metoda vířivých proudů, protože dokáže zaznamenat vady těsně pod povrchem (v hloubce několika milimetrů). Ultrazvuková metoda se využívá pro zaznamenání vnitřní vad, a protože není životu nebezpečná, upřednostňuje se před radiografickou metodou.

	Využití na materiálu	Aplikace v letectví
Kapilární metoda *1	- kovové materiály (austenitické oceli, barevné kovy a jejich slitiny), - nekovové materiály (plastické hmoty, glazovaná keramika, sklo),	Trhliny, prasklin, pórů, přeložek – na výkvcích, odlitcích a svarech. Kontrola těsnosti, ozubených kol, šroubů a jejich závitů.
Metoda vířivých proudů *1	- kovové vodivé materiály (železo, titan, hliník a jeho slitiny), - kompozity typu ARALL (aramidové kompozity) a GLARE (sklo-hliníkový kompozit).	Trhliny, důlky, koroze, škrábance, zářezy, rýhy, promáčkliny, jizvy, obroušení.
Ultrazvuková metoda *1	- kovové materiály - nekovové materiály	Měření úbytku materiálu (tloušťka povrchu), delaminace, dutiny, vnitřní trhliny.
Magnetická prášková metoda *3	- feromagnetické materiály (železo a její slitiny)	Povrchové trhliny, praskliny, póry - čepy, svary, ozubené kola, propojovací piny.
Termografická metoda *2	- kovové materiály - nekovové materiály	Delaminace, vměstky, dutiny, kontrola zmrzlé vody ve voštině (horizontální stabilizátor, směrovém kormidlu a na vztlakových klapkách).
Radiografická metoda *3	- kovové materiály - nekovové materiály	Vměstky, dutiny, vložkové trhliny, kontrola tloušťky materiálu – lopatky turbíny a kompresoru. V oblasti centroplánu (přechod křídlo trup), kontrola spalovací komory.
Frekvence použití v letectví *1 Vysoká frekvence *2 Střední frekvence *3 Nízká frekvence		

Tab. 4.4 Využitelnost nedestruktivních metod v organizaci údržby

4.3 Identifikace povrchových vad vyskytujících se na letadlových dílcích

Jedním z dalších důležitých kroku, při volbě vhodné nedestruktivní metody, je správná identifikace nalezené povrchové vady (Tab. 4.5). Od druhu povrchové vady se

dále odvíjí volba nedestruktivní metody. Jednotlivé povrchové vady se od sebe příliš neliší, proto je důležité znát jejich vzhled.

Jak už je zmíněno v kapitole číslo dva, tak vznik jednotlivých povrchových vad, je způsoben:

- mechanickým poškozením,
- chemickým/elektrochemickým působením,
- Tepelným působením.

Jak vyplývá z tabulky, tak největší vliv na povrchové vady má mechanické poškození. Mechanické poškození je způsobeno například odlétajícím kamením od podvozku (nejčastěji poškozeny vztahové klapky, křídélka nebo potah letadla), při otěru rotujících částí nebo při nešetrném zacházení personálu.

Následuje vliv tepelného působení, který je způsoben například nadměrným přehřátím součástí nebo při úderu blesku.

Posledním vlivem je chemické/elektrochemické působení, které nejčastěji vzniká v důsledku rozlití chemikálie nebo při nadměrné vlhkosti. Jednotlivé vlivy se snažíme co nejvíce eliminovat, protože pokud je součást poškozená, snižuje se její životnost a s tím i spojená možná výměna (zvýšení financí).

	Skupiny důvodů povrchových poškození			Identifikace
	Mechanické	Chemické/ Elektricko- chemické	Tepelné	
Škrábanec (Scratch)	X			Čára poškození povrchu různé délky a hloubky.
Drážka (Gouge)	X			Libovolná poškození, která má za následek změnu plochy průřezu. Poškození se podobá kanálku.
Jizva/Značka (Mark)	X			Poškození, ve kterém se nacházejí škrábance, drážky, důlky. Musí se posuzovat jako celek, ne jako série jednotlivých poškození.
Trhlina (Crack)	X		X	Částečná zlomenina materiálu.
Důlek (Dent)	X			Poškození, které je vtlačeno do materiálu s ohledem její obvyklý obrys. Nedochází k žádné změně průřezové plochy v materiálu, okraje oblasti jsou hladké
Zakřivení (Distortion)	X		X	Trvalá změna stavu materiálu.
Koroze (Corrosion)		X		Odlišná barva povrchu materiálu.
Přehyb (Crease)	X			Poškozený povrch, který je složen na sebe, a hrany jsou ostré.
Otěr (Abrasion)	X		X	Povrch je drsný, matný a nepravidelný
Rozlepení (Debonding)	X	X	X	Vzniká v důsledku selhání lepidla například nafukovací vaky na náběžných hranách.
Delaminace (Delamination)	X	X	X	Stejný důvod vzniku jako u rozlepení s tím rozdílem, že delaminace vzniká u kompozitních materiálů.
Ohoření (Burn mark)			X	Poškození je charakterizováno zčernáním části zasaženého povrchu..
Proražení (Penetration)	X			Poškození, které prochází skrz celý materiál.

Tab. 4.5 Povrchové vady vyskytující se na letadlových dílcích

Jak popisuje Tab. 4.6 tak na jednotlivé druhy povrchových vad lze uplatnit více druhů nedestruktivních zkoušek. Jak z tabulky vyplývá, tak metoda vířivých proudů je nejpoužívanější nedestruktivní metodou, kterou lze využít na povrchové vady. Tato

metoda se dá využít téměř na všechny povrchové poškození. Pouze na delaminaci a rozlepení se využívá termografická metoda.

U trhlin a škrábanců lze využít také penetrační metodu. Tato metoda je využita v případě, že rozměry zkoušeného dílce, jsou nevyhovující pro metodu vířivých proudů například zkoušený dílec má mnoho záhybů a hran. V tomto případě je lepší zvolit penetrační zkoušku. U tohoto typu poškození je možné využít také magneticky práškovou metodu, ale ta se příliš nevyužívá. Využije se pouze tehdy, když je letadlový dílec vyrobený z feromagnetického materiálu.

U koroze a otěrů je dobré, aby se provedla kombinace dvou nedestruktivních metod. Nejčastěji se v leteckém provozu kombinují metody vířivých proudů a ultrazvuková metoda. V tomto případě je ultrazvuková metoda využita pro zjištění úbytku materiálu v místě poškození.

Škrábanec (Scratch)	Metoda vířivých proudů, Penetrační zkouška, Magnetická prášková metoda
Drážka (Gouge)	Metoda vířivých proudů
Jizva/Značka (Mark)	Metoda vířivých proudů
Trhlina (Crack)	Metoda vířivých proudů, Penetrační zkouška, Magnetická prášková metoda
Důlek (Dent)	Metoda vířivých proudů
Zakřivení (Distortion)	Metoda vířivých proudů
Koroze (Corrosion)	Metoda vířivých proudů + Ultrazvuková metoda/Radiografická metoda
Přehyb (Crease)	Metoda vířivých proudů
Otěr (Abrasion)	Metoda vířivých proudů + Ultrazvuková metoda/Radiografická metoda
Rozlepení (Debonding)	Termografická metoda
Delaminace (Delamination)	Termografická metoda
Ohoření (Burn mark)	Metoda vířivé proudy
Proražení (Penetration)	Metoda vířivé proudy

Tab. 4.6 Výběr nedestruktivních metod na povrchové vady

Tab. 4.6 pouze doporučuje, která nedestruktivní metoda je pro dané poškození nejvhodnější. V některých případech se pracovník rozhodne zvolit jinou metodu, a to

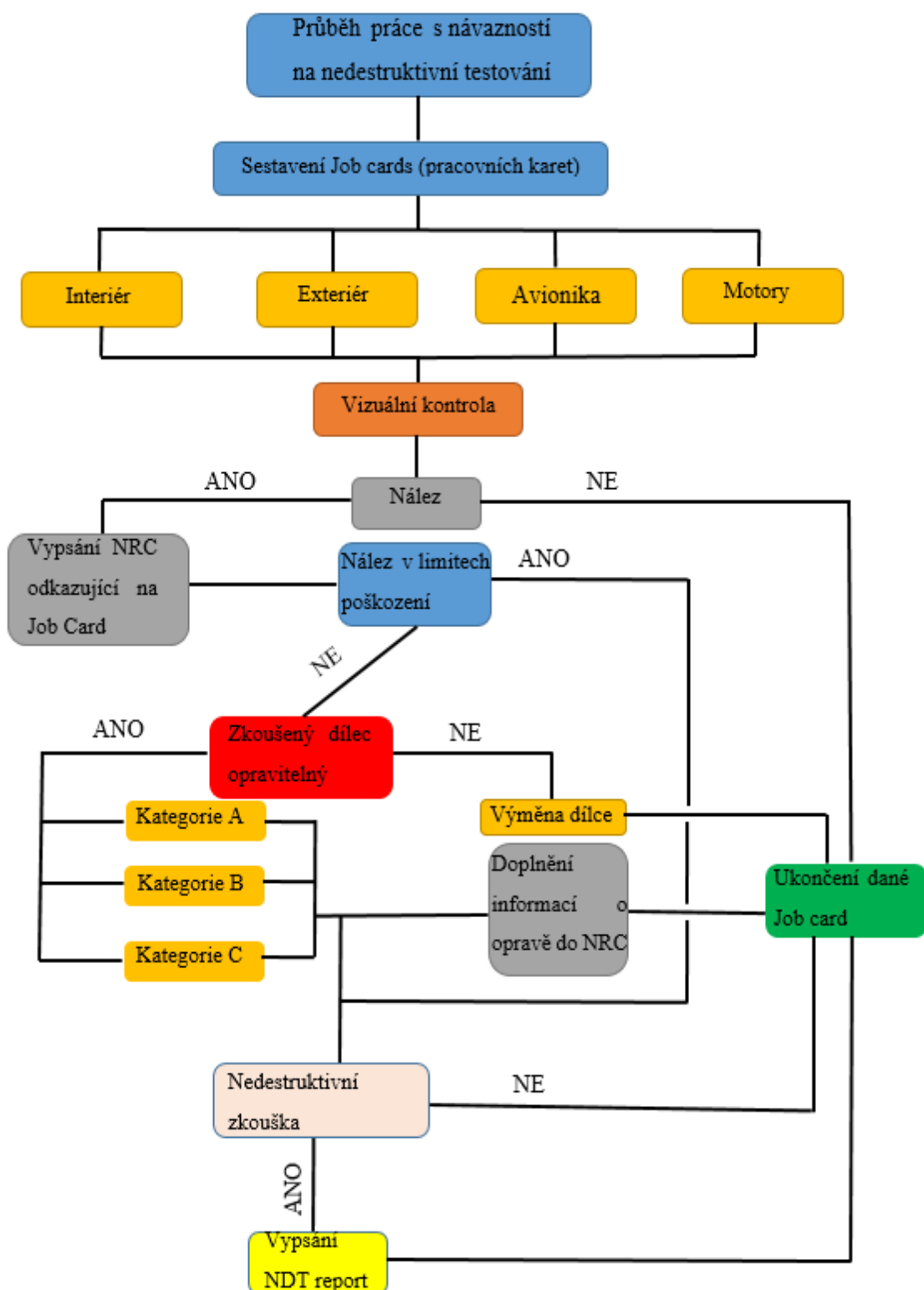
tehdy když letadlový dílec disponuje jistým omezením, které nelze přehlížet například různé druhy vad (poškození) na zkoušeném dílci.

4.4 Postup provádění práce

Provádění nedestruktivních zkoušek je v leteckém provozu nezbytné, avšak není vždy nutné. Nedestruktivní zkoušky se provádějí v návaznosti na průběh vizuální kontroly na daném letadlovém dílci. Průběh práce na letadlovém dílci s návazností na nedestruktivní zkoušky je znázorněn pomocí algoritmu (Obr. 4.48).

Personál údržby provádí vizuální kontrolu dle požadavků Job card, které jsou rozděleny do jednotlivých sekcí (interiér, exteriér, avionika a motory). U vizuální kontroly se letecký personál zaměřuje na různé odchylky materiálu (Tab. 4.5). Pokud pracovník nenalezne žádnou závadu, odepíše Job card. Pokud je při vizuální kontrole nalezena povrchová vada, je nutné vypsát NRC dokument, který se odkazuje na danou Job card. Do NRC dokumentu se zapisují veškeré informace o nalezené povrchové vadě, a také to, zda je povrchová vada v limitech poškození. Limitní poškození lze najít v SRM. Pokud je povrchové poškození v normě a zákazník nebo dokument SRM nevyžaduje nedestruktivní zkoušku, je prohlídka ukončena spolu s Job card. Není – li poškození v normě, následuje proces vyhodnocování, zda je letadlový díle opravitelný. Pokud není, je nutné dílec vyměnit. Pokud je opravitelný, provádí se oprava, která je rozdělena do tří kategorií – kategorie A, B, C. SRM určuje, do jaké kategorie oprava spadá. Jednotlivé kategorie se od sebe liší z hlediska délky dalšího provozování. Po opravě je nutné provést doplňující zápis o opravě do NRC dokumentu. Ve většině případů je po opravě nutné provést nedestruktivní zkoušku, ale existují také výjimky, kdy se nedestruktivní zkouška nemusí provádět. Možné výjimky lze najít v dokumentu SRM. Následuje nedestruktivní zkouška, kterou volí pracovník podle charakteru opravy, popřípadě podle nálezného povrchového poškození. Po provedení nedestruktivní zkoušky je nutné vypsát NDT report. Po vypsání NDT reportu, je tento dokument spolu s NRC dokumentem přiložen k Job card, kterou lze následně ukončit.

Jednotlivé práce v údržbové organizaci se prolínají, a proto je důležité, aby pracovníci na pracovišti byli dostatečně kvalifikovaní a zkušení.



Obr. 4.48 Algoritmus postupu provádění prací

5 Závěr

V leteckém oboru je bezpečnost na prvním místě. Tuto prioritu se snaží dodržovat každá údržbová organizace, ale mnohdy je to finančně náročné. Aby se snížila finanční náročnost údržby, jsou v hojné míře využívány nedestruktivní zkoušky materiálů. Nedestruktivní zkoušky jsou velice spolehlivé, dokáží rychle určit skutečný stav daného letadlového dílce, což splní požadavek týkající se bezpečnosti a navíc jsou finančně ne náročné. Proto se nedestruktivní zkoušky staly nedílnou součástí každé údržbové organizace. Jejich použití je čím dál širší a lze v tomto směru očekávat další vývoj.

V úvodní kapitole bakalářské práce jsou v krátkosti zmíněny informace o nedestruktivních metodách a důvody, proč jsou v leteckém průmyslu nepostradatelné. Následující kapitola popisuje povrchové a podpovrchové vady, které se v leteckém provozu mohou objevit. Z této kapitoly vyplývá, že podpovrchové vady vznikají nejčastěji ve výrobním procesu, oproti tomu povrchové vady vznikají v důsledku provozování letecké součásti. Každé poškození, které se na letecké součásti objeví, snižuje jeho životnost a hlavně jeho bezpečnost v provozu.

Aby údržbový personál určil, zda je letecká součást schopná bezpečného provozu, je nutné využít nedestruktivních zkoušek, a proto další kapitola této bakalářské práce je věnována obecně nedestruktivním metodám. V této kapitole jsou popsány základní fyzikální principy, se kterými jednotlivé nedestruktivní metody pracují, jejich princip vzniku a také jaké druhy nedestruktivních metod mohou být. Pracovník údržby musí znát jednotlivé fyzikální principy, protože podle těchto principů se seřizují nedestruktivní zařízení.

Poslední kapitola bakalářské práce je věnována metodice výběru nedestruktivní metody na specifické povrchové poškození. Pro správnou volbu je nutné znát SRM a NDT dokumenty, které úzce souvisí s nedestruktivními zkouškami. Proto, aby provádějící pracovník zvolil správnou nedestruktivní zkoušku, je nutné, aby přesně identifikoval nalezenou povrchovou vadu. Dalším krokem pro zvolení správné nedestruktivní metody je znalost jejich výhod, nevýhod a hlavně jejich omezení. V neposlední řadě je v kapitole vytvořený algoritmus provádění práce v organizaci údržby letadel, v návaznosti na nedestruktivní zkoušky. Algoritmus by měl leteckému technikovi pomoci pochopit návaznost jednotlivých prací v organizaci údržby. Pokud

všechny tyto informace pracovník zná, je velice pravděpodobně, že zvolí správnou nedestruktivní zkoušku.

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Vojtěchu Grafovi, Ph. D. za odborné vedení práce, poskytnutí cenných rad a připomínek a za vstřícnost při konzultacích a vypracovávání práce.

Dále bych chtěl poděkovat panu Bc. Ivo Vaňákovi, za jeho pomoc při získávání všech potřebných informací.

6 Seznam použité literatury

- [1] KOPEC, Bernard. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: (Nauka o materiálu IV)*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008, 571 s. ISBN 978-80-7204-591-4.
- [2] VONTOR, Jakub, 2018. *Metody nedestruktivního zkoušení materiálů a výrobků*. [online]. Brno. Bakalářská práce. FSI VUT. [cit. 27. 2. 2020]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=173290
- [3] ZELENDA, Michal, 2010. *Únavový lom klikové hřídele osobního automobilu* [online]. Pardubice. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice. [cit. 27. 2. 2020] Dostupné z: https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/36709/ZelendaM_Unavovylom_PS_2010.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [4] FOKT, Radim, 2009. *Metody vyhledávání koroze na draku letounů všech typů při provádění údržby* [online]. Ostrava. Bakalářská práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava. [cit. 1. 3. 2020] Dostupné z: https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/71741/FOK006_FS_B2341_3708R028_70_2009.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [5] MUNI., nedatováno. *Údržba a opravy stájové techniky - druhy korozního napadení* [online]. [cit. 1. 3. 2020]. Dostupné z: http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/print.php?page=3717&typ=html
- [6] PATRASCU, Daniel, 2019. *This Is What Corrosion Does to an F-22 Raptor Fighter Plane. autoevolution* [online] [cit. 1. 3. 2020]. Dostupné z: <https://www.autoevolution.com/news/this-is-what-corrosion-does-to-an-f-22-raptor-fighter-plane-136404.html>
- [7] TOTAL MATARIA., nedatováno. *Clean Steel: Part Two :: Total Materia Article* [online] [cit. 3. 3. 2020]. Dostupné z: <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&LN=TH&NM=198>
- [8] VŠB., nedatováno. *Bakalářská fyzika pro HGF VŠB-TUO* [online] [cit. 16. 11. 2019]. Dostupné z: <http://if.vsb.cz/bf/45.html>

- [9] STAVEBNICTVÍ3000.CZ., nedatováno. *Principy vztlínání kapalin* | *Stavebnictvi3000.cz* [online] [cit. 16. 11. 2019]. Dostupné z: <https://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/principy-vzlinani-kapalin>
- [10] TICHÝ, Petr, 2014. *Metoda vířivých proudů stupeň I,II*. Praha: ATG - Advanced Technology Group s.r.o. [cit. 14. 1. 2020].
- [11] PILAŘ, Petr, 2016. *Návrh měřicího zařízení pro analýzu rovnoměrnosti platů* [online]. Liberec. Bakalářská práce. Technická Univerzita Liberec. [cit. 20. 1. 2020] Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/20570/V%20128-16%20Sb.pdf?sequence=5&isAllowed=y>
- [12] REGAZZO, Richard a Marcela REGAZZOVÁ, 2013. *Ultrazvuk: základy ultrazvukové defektoskopie*. Praha: BEN - technická literatura. ISBN 978-80-7300-466-8.
- [13] FYZIKA., nedatováno. *ELUC* [online] [cit. 23. 1. 2020]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1667>
- [14] JAROMIR, Karolina., nedatováno. *Phased Array Weld Inspection – Cave Inspection Ltd.* [online]. [cit. 20. 1. 2020]. Dostupné z: <https://www.caveinspection.ca/services/phased-array-weld-inspection/>
- [15] VÁCA, Tomáš, 2017. *Porovnání NDT odezvy od různých typů umělých i provozních vad* [online]. Plzeň. Diplomová práce. Západočeská Univerzita v Plzni. [cit. 2. 3. 2020] Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/26926/1/VACA_DP.pdf
- [16] DERYCH, David, 2018. *Nedestruktivní zkoušení materiálů při využití magnetické metody práškové* [online]. Ostrava. Bakalářská práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava. [cit. 2. 3. 2020] Dostupné z: https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/129667/DER0014_FS_B2341_2301R023_2018.pdf?sequence=1
- [17] ČSVE., nedatováno. - *ČSVE - Wind power-plants | Wind energy* [online] [cit. 5. 2. 2020]. Dostupné z: <https://csve.cz/en/clanky/ocelovy-tubusovy-stozar/229#prettyPhoto>
- [18] ELEKTROTECHNICKÉ MATERIÁLY 1., nedatováno. *Magnetické materiály* [online] [7. 2. 2020]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/353/07.html>

- [19] BERENS., nedatováno. *Humans are nearly blind to most wavelenth of light. Is there a possibility that we can see the world around us using radio waves? - Quora* [online] [cit. 10. 2. 2020]. Dostupné z: <https://www.quora.com/Humans-are-nearly-blind-to-most-wavelenth-of-light-Is-there-a-possibility-that-we-can-see-the-world-around-us-using-radio-waves>
- [20] ŠKEŘÍK, Petr, 2012. *Infračervená termografie stupeň I,II*. Praha: ATG - Advanced Technology Group s.r.o. [cit. 14. 1. 2020]
- [21] AIRBUS., *Non-destructive testing*. B.m.: Airbus [21. 2. 2020].

7 Seznam použitých obrázků

Obrázek 2.1:	Struktura ideální krystalové mřížky, s. 14
Obrázek 2.2:	Šablona drsnosti povrchu, s. 16
Obrázek 2.3:	Podélná trhлина a příčná trhлина, s. 17
Obrázek 2.4:	Únavový lom, s. 17
Obrázek 2.5:	Schéma bodové koroze a bodová koroze na potahu draku, s. 19
Obrázek 2.6:	Štěrbínová koroze palivového víčka a v rámu nosníku, s. 19
Obrázek 2.7:	Galvanická koroze kompozitu, s. 20
Obrázek 2.8:	Promáčkliny na potahu Saab 340, s. 21
Obrázek 2.9:	Rozložení vměstků v oceli, s. 22
Obrázek 2.10:	Vznik dutiny ve výrobě, s. 22
Obrázek 2.11:	Vločková trhлина, s. 23
Obrázek 2.12:	Schéma kompozitního materiálu, s. 23
Obrázek 2.13:	Delaminace kompozitu, s. 24
Obrázek 2.14:	Delaminace kolem místa průchodu blesku, s. 25
Obrázek 3.15:	Komora pro ultrafialovou lampu a přípravek na měření UV světla, s. 28
Obrázek 3.16:	Referenční vzorek před zkouškou a po zkoušce, s. 31
Obrázek 3.17:	Vznik vířivých proudů ve zkoušeném materiálu, s. 33
Obrázek 3.18:	Krajový efekt, s. 34
Obrázek 3.19:	Pohyb příložné sondy po zkoušeném materiálu, s. 35
Obrázek 3.20:	Příložná sonda, s. 35
Obrázek 3.21:	Sonda rotační, s. 36
Obrázek 3.22:	Referenční vzorek pro rotační sondu, s. 37

Obrázek 3.23:	Referenční vzorek pro příložnou sondu, s. 37
Obrázek 3.24:	Zobrazení signálu pomocí křivek, s. 37
Obrázek 3.25:	Přímá sonda a úhlová sonda, s. 40
Obrázek 3.26:	Bezkontaktní průchodová metoda a kontaktní průchodová metoda, s. 41
Obrázek 3.27:	Bezkontaktní odrazová metoda, s. 42
Obrázek 3.28:	Schéma signálu, s. 42
Obrázek 3.29:	Vysílání a příjem signálu při technice Phased array, s. 43
Obrázek 3.30:	Phased array, s. 43
Obrázek 3.31:	Pólová magnetizace cívkou a pomocí magnetizačního jho, s. 45
Obrázek 3.32:	Přípravek pro cirkulární magnetizaci, s. 46
Obrázek 3.33:	Nedostatečně a dostatečně zmagnetovaný předmět, s. 46
Obrázek 3.34:	Detekce feromagnetickým práškem, s. 47
Obrázek 3.35:	Bertholdova a ASTM měrka, s. 48
Obrázek 3.36:	Hysterézní křivka magnetických měkkých látek a magneticky tvrdých látek, s. 49
Obrázek 3.37:	Závislost velikosti rozptylového toku na tvaru trhliny, s. 50
Obrázek 3.38:	Schéma termokamery a termokamera v provozu, s. 52
Obrázek 3.39:	Průběh termografické zkoušky, s. 53
Obrázek 3.40:	Kontrola neslepení a zmrzlá voda ve voštině, s. 53
Obrázek 3.41:	Schéma rentgenky, s. 55
Obrázek 3.42:	Elektromagnetické spektrum rentgenového záření a gama záření, s. 56
Obrázek 3.43:	Princip radiografické metody, s. 57
Obrázek 3.44:	Radiografický snímek s podélnou vadou ve svaru, s. 58

- Obrázek 4.45: Hlavička NDT reportu, s. 61
- Obrázek 4.46: Schéma rozdělení povrchových metod, s. 64
- Obrázek 4.47: Schéma rozdělení podpovrchových metod, s. 65
- Obrázek 4.48: Algoritmus postupu provádění prací, s. 72

8 Seznam tabulek

- Tabulka 4.1: Symboly a zkratky nedestruktivního zkoušení, s. 60
- Tabulka 4.2: Kapitoly z SRM, s. 60
- Tabulka 4.3: Porovnání nedestruktivních metody, s. 63
- Tabulka 4.4: Využitelnost nedestruktivních metod v organizaci údržby, s. 67
- Tabulka 4.5: Povrchové vady vyskytující se na letadlových dílcích, s. 69
- Tabulka 4.6: Výběr nedestruktivních metod na povrchové vady, s. 70

9 Seznam příloh

- Příloha č. 3.1: Základní teorie kapilárních metod, cd.
- Příloha č. 3.2: Základy elektromagnetických polí, cd.
- Příloha č. 3.3: Základy ultrazvuku, cd.
- Příloha č. 3.4: Základy magnetismu, cd.
- Příloha č. 3.5: Infračervené záření, cd.
- Příloha č. 3.6: Základy elektromagnetického záření, cd.